

DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO
***HOLLOW CYLINDER TORSIONAL* PARA SOLOS**

Juliana de Azevedo Bernardes

Porto Alegre
19 de dezembro de 2008

Juliana de Azevedo Bernardes

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO
HOLLOW CYLINDER TORSIONAL PARA SOLOS**

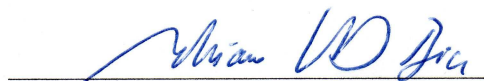
Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para a obtenção do título de
DOUTOR EM ENGENHARIA

Porto Alegre
19 de dezembro de 2008

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO
HOLLOW CYLINDER TORSIONAL PARA SOLOS**

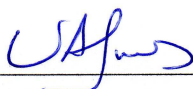
Esta Tese de Doutorado foi julgada adequada como parte dos requisitos para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA e aprovada pelos professores orientadores e pelo

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul



Prof. Dr. Adriano Virgílio Damiani Bica

ORIENTADOR



Prof. Dr. Washington Peres Núñez

ORIENTADOR



Prof. Dr. Fernando Schnaid

Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Luciano Pivoto Specht

D.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Helena Beatriz Bettella Cybis

PhD. pela University Of Leeds, Grã-Bretanha

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti

D.Sc. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

B522d Bernardes, Juliana de Azevedo
Desenvolvimento de um equipamento Hollow Cylinder Torsional para solos / Juliana de Azevedo Bernardes. – 2008.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2008.

Orientação: Prof. Dr. Adriano Virgílio Damiani Bica
Prof. Dr. Washington Peres Núñez

1. Geotécnica – Equipamento. 2. Mecânica dos solos – Ensaios. I. Bica, Adriano Virgílio Damiani, orient. II. Peres Núñez, Washington, orient. III. Título.

Dedico esta tese aos meus pais e ao meu marido

AGRADECIMENTOS

Agradeço os meus orientadores Adriano Virgílio Damiani Bica e Washington Peres Núñez. Em especial ao professor Bica pela disponibilidade e envolvimento irrestrito no processo de concepção e montagem do equipamento.

Aos bolsistas de iniciação científica Mariana, João e Diego, que auxiliaram neste trabalho em diferentes etapas e ao laboratorista Jair, pelo constante auxílio e dedicação na montagem do equipamento.

Ao professor Juan Ortiz do DEMEC/ UFRGS pelas sugestões no projeto estrutural do equipamento. Ao Gabriel da Delmaq pela atenção e disponibilidade na usinagem da peças metálicas do equipamento.

Ao CNPQ pela bolsa de doutorado a mim concedida e pelos recursos fornecidos para montagem do equipamento através do Edital Universal.

Aos colegas da Profill Engenharia e Ambiente pela compreensão e apoio na fase final desta tese.

A todos os colegas e professores do PPGEC que tive contato ao longo dos últimos 8 anos, e que de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse realizado. Não citarei nomes para não cometer a indelicadeza de esquecer alguém, mas não posso deixar de agradecer a duas pessoas em especial: Luciana, uma amiga e colega, com quem compartilhei as angústias desta fase de doutorado, mas também muitas outras coisas boas; e a Lilian, minha amiga e colega de pós-graduação, presente em minha vida desde o primeiro dia de PPGEC, agradeço pelo companheirismo e atenção, o mérito desta defesa também é teu.

Aos meus pais, Eloi e Beatriz, que sempre me incentivaram e acreditaram que este dia iria chegar. Agradeço a atenção, o amor e a dedicação que sempre tiveram comigo.

Ao meu marido Rodrigo, faltam palavras de agradecimento. Todo o companheirismo, dedicação, cumplicidade, amor e reciprocidade fazem com que a cada dia eu me torne uma pessoa melhor. Te amo e te admiro mais que tudo, esta tese é nossa e sem o teu apoio eu não teria chegado tão longe.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE QUADROS E TABELAS	14
LISTA DE SIMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	15
RESUMO	17
ABSTRACT	18
1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 Objetivos da pesquisa	19
1.2 Estrutura da tese.....	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 A rotação do plano de tensões principais	22
2.2 Ensaio <i>hollow cylinder torsional</i>	27
2.2.1 Princípios do ensaio <i>hollow cylinder torsional</i>	27
2.2.2 Distribuição de tensões em corpos de prova do ensaio <i>hollow cylinder</i>	30
2.2.3 Seleção da geometria do corpo de prova	36
2.2.4 Exemplos de moldagem de corpos de prova <i>hollow cylinder</i>	38
2.2.5 Aplicações do equipamento <i>hollow cylinder torsional</i>	42
2.2.6 Equipamentos <i>hollow cylinder torsional</i> no mundo.....	52
2.3 Comportamento de materiais granulares empregados em camadas de pavimentos	68
2.3.1 Comportamento tensão-deformação.....	68
2.3.2 Estudo do comportamento tensão-deformação em laboratório	72
2.4 O solo residual de arenito Botucatu.....	78
2.4.1 Aspectos geológicos da Formação Botucatu	78
2.4.2 Características gerais do solo residual de arenito Botucatu	79
2.4.3 Mineralogia e microestrutura do solo residual de arenito Botucatu.....	82
3 MONTAGEM DO EQUIPAMENTO <i>HOLLOW CYLINDER</i>	86
3.1 Descrição estrutural do equipamento	86
3.2 Sistema de aplicação de pressões	108
3.3 Sistema de aquisição de dados.....	112
3.3.1 HBM <i>Catman 4.5</i>	113
3.4 Instrumentação do ensaio	114
3.4.1 Células de Carga.....	114

3.4.2	Transdutores de deslocamento.....	115
3.4.3	Transmissor de pressão.....	117
4	MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO.....	119
4.1	Solo residual de arenito Botucatu.....	119
4.1.1	O sítio da Vila Scharlau.....	119
4.1.2	Ensaio de caracterização.....	121
4.1.3	Ensaio de compactação.....	122
4.1.4	Ensaio para determinação do Índice suporte Califórnia.....	127
4.2	Programa experimental de laboratório.....	127
4.2.1	Ensaio triaxiais de carregamento repetido.....	127
4.2.2	Ensaio <i>hollow cylinder torsional</i>	135
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	153
5.1	Ensaio triaxiais de carregamento repetido.....	153
5.1.1	Determinação do módulo de resiliência.....	153
5.1.2	Resistência a deformações permanentes.....	157
5.2	Ensaio <i>hollow cylinder torsional</i>	161
5.2.1	Ensaio no corpo de prova teste.....	161
5.2.2	Ensaio em solo.....	165
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	189
6.1	Conclusões.....	189
6.2	Sugestões para futuros trabalhos.....	192
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	194
	ANEXO A.....	205

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplos de rotação das tensões principais em obras geotécnicas de ambientes urbanos (Nasreddine, 2004).....	23
Figura 2.2 – Exemplos de diferentes representações das tensões ocasionadas por um carregamento circular no solo: (a) contornos de $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3/2p$. (b) contornos de α , (c) contornos de b (Leroueil e Hight, 2002).	23
Figura 2.3 – variação de α ao longo de uma superfície de ruptura de um aterro (Leroueil e Hight, 2002).....	24
Figura 2.4- Rotação das tensões principais em um elemento de solo.	25
Figura 2.5 – Estado de tensão representado em um elemento de corpo de prova do ensaio <i>hollow cylinder</i> sujeito à carga axial (F), torque (T), pressão interna (p_i) e pressão externa (p_e): (a) corpo de prova <i>hollow cylinder</i> ; (b) tensões em um elemento na parede do corpo de prova; (c) tensões principais em um elemento na parede do corpo de prova; (d) representação das tensões na parede do corpo de prova através do círculo de Mohr.....	28
Figura 2.6 – Parâmetros envolvidos na determinação das tensões médias e deformações médias (Hight <i>et al.</i> , 1983).	31
Figura 2.7 – Definições utilizadas para avaliar a não-uniformidade de tensões (Hight <i>et al.</i> , 1983).....	34
Figura 2.8 – Variação da não-uniformidade de tensões cisalhantes com a geometria do corpo de prova. (Hight <i>et al.</i> , 1983).....	34
Figura 2.9 – Métodos de moldagem de corpos de prova para o ensaio <i>hollow cylinder</i> utilizados por Chaudhary <i>et al.</i> (2002).	42
Figura 2.10 – Trajetórias de carregamentos utilizados nos ensaios <i>hollow cylinder</i> de Symes <i>et al.</i> (1984): (a) ensaios com α constante, (b) rotação de α durante o ensaio e (c) rotação cíclica de α	44
Figura 2.11 – Representação esquemática do plano preferencial de deposição das partículas, em uma amostra de areia com anisotropia inerente (Miura <i>et al.</i> , 1986b).	45
Figura 2.12 – Variação de ϕ' com α , em ensaios <i>hollow cylinder</i> com $b = 0,5$ e $b = 0,3$, e valores de ϕ' para $b = 0$ e $b = 1$ (compressão e extensão triaxial, respectivamente), conforme Zdravkovic e Jardine (2000).....	47
Figura 2.13 – Tensões ocasionadas pelo movimento das ondas em um depósito marítimo de areia: (a) crista da onda sobre um elemento de solo, (b) tensões cisalhantes defasadas de 90° das tensões normais (Ishirara e Towhata, 1983).....	48
Fig 2.14 – (a) comparação entre ensaios <i>hollow cylinder</i> e <i>simple shear</i> e (b) variação cíclica de α com a deformação cisalhante em ensaio <i>hollow cylinder</i> (Talesnick e Frydman, 1991). 51	51
Figura 2.15 – Corpos de prova com formatos definidos pelo modelo numérico e corpos de prova após o ensaio <i>hollow cylinder</i> : (a) ensaio de compressão, (b) ensaio de extensão e (c) ensaio torsional (Nasreddine, 2004).	52
Figura 2.16 –Equipamentos <i>hollow cylinder</i> torsional do Imperial College: (a) Hight <i>et al.</i> (1983), (b) Nishimura (2005) e (c) Minh (2006).....	54

Figura 2.17 – Detalhe do sistema de aplicação de torque (vista superior), conforme Hight <i>et al.</i> (1983).	55
Figura 2.18 - Instrumentação local do corpo de prova utilizada por Minh (2006): (a) vista frontal do corpo de prova instalado na câmara de ensaio e (b) vista superior do corpo de prova.	55
Figura 2.19 – Cabeçote e pedestal desenvolvidos por Chan (1990).	57
Figura 2.20 – Equipamento hollow cylinder torsional da Nottingham University: (a) primeira versão de O'Reilly (1985); (b) após modificações de Richardson (1999).	57
Figura 2.21 – Equipamentos hollow cylinder torsional em Portugal (Bilé Serra e Hooker, 2003).	59
Figura 2.22 – Equipamentos hollow cylinder torsional utilizados no University College Dublin, Irlanda (O'Kelly e Naughton, 2005).	59
Figura 2.23 - Equipamento hollow cylinder torsional da ENTPE - França (Geoffroy <i>et al.</i> , 2003): (a) layout geral e (b) instrumentação local do corpo de prova.	60
Figura 2.24 – Esquema da câmara do equipamento hollow cylinder torsional do LCPC - França (Nasreddine, 2004):	60
Figura 2.25 – Sistema de aplicação de torque utilizado por Tatsuoka <i>et al.</i> (1982).	63
Figura 2.26 – Equipamentos <i>hollow cylinder torsional</i> da <i>University of Tokyo</i> : (a) Ampadu e Tatsuoka (1993), (b) Yoshime <i>et al.</i> (1998), e (c) Miura <i>et al.</i> (1986a).	64
Figura 2.27 – (a) layout do equipamento <i>hollow cylinder torsional</i> de <i>British Columbia</i> e (b) detalhe do seu sistema de aplicação de torque (Vaid <i>et al.</i> , 1990).	67
Figura 2.28 – Equipamento <i>hollow cylinder torsional</i> da <i>UCLA</i> (Hong e Lade, 1989).	68
Figura 2.29 – Variações de tensões em elemento de solo causadas por uma carga móvel.	71
Figura 2.30 – Variações de tensões em elemento de pavimento em função do tempo, provocadas pela passagem dos veículos.	71
Figura 2.31 – Deformação em materiais granulares durante um ciclo de aplicação de carga.	72
Figura 2.32 – Influência da rotação das tensões principais nas deformações permanentes acumuladas no ensaio <i>hollow cylinder torsional</i> (Chan, 1990).	77
Figura 2.33 – Variação linear da deformação permanente com o logaritmo do número de ciclos de carga, conforme apresentado por (Chan, 1990).	77
Figura 2.34 – Trajetórias de tensão aplicadas no carregamento monotônico para $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ (Richardson, 1999).	78
Figura 2.35 - Arranjo de grãos do solo residual de arenito Botucatu: textura clástica com concentração de óxido de ferro nas bandas de granulometria fina (Martins, 2001).	84
Figura 2.36- Aspecto estruturado da amostra natural do solo residual de arenito Botucatu, com grãos de quartzo encaixados na matriz caulínica (Martins, 2001).	85
Figura 2.37 - Aspecto desorganizado da amostra reconstituída do solo residual de arenito Botucatu (Martins, 2001).	85
Figura 3.1 – <i>Layout</i> geral do equipamento <i>hollow cylinder</i> em corte, com a identificação de suas principais peças	87

Figura 3.2 - Fotografia do layout geral do equipamento <i>hollow cylinder torsional</i> com o quadro pneumático e o sistema de aquisição automática de dados.	88
Figura 3.3 – Placa de alumínio da base do equipamento e blocos de concreto: (a) desenho esquemático e (b) fotografia da placa fixada nos blocos.	89
Figura 3.4 – Sistema de fixação da barra central do cilindro pneumático vertical ao eixo central do equipamento <i>hollow cylinder</i> (a) desenho esquemático da montagem das peças (b) fotografia e identificação das peças.	90
Figura 3.5 – Cilindro pneumático que aplica a carga axial: (a) desenho esquemático das peças componentes, (b) fotografia do cilindro montado e pintado.	91
Figura 3.6 – Cilindros pneumáticos que aplicam o torque: (a) desenho esquemático das peças componentes, (b) fotografia das peças e (c) fotografia dos cilindros montados e pintados.	93
Figura 3.7 – Sistema de aplicação de torque: (a) desenho esquemático (medidas em mm), (b) fotografias.	94
Figura 3.8 – Fotografias e identificação das peças que compõem o sistema de aplicação de torque.	95
Figura 3.9 – Suportes que acoplam os rolamentos lineares na placa de alumínio intermediária: (a) desenho esquemático (medidas em mm) e (b) fotografia.	95
Figura 3.10 - Vista superior da placa inferior de aço inoxidável da câmara triaxial do equipamento <i>hollow cylinder</i> : (a) desenho esquemático e (b) fotografia da peça.	97
Figura 3.11 – Rolamentos lineares e axiais para minimizar o atrito no eixo central: (a) desenho esquemático em corte, com a localização e identificação das peças, (b) fotografia de um dos rolamentos axiais, (c) fotografia de um dos rolamentos lineares, (d) fotografia dos anéis <i>O-ring</i> , do eixo de fixação dos rolamentos lineares e da peça de proteção do rolamento axial inferior e (e) porca com rolamento axial superior.	98
Figura 3.12 – Tubo de acrílico com anéis de reforço em fibra de vidro do equipamento <i>hollow cylinder</i> : (a) desenho esquemático e (b) fotografia.	99
Figura 3.13 – Placa circular superior de aço inoxidável e peças complementares: (a) desenho esquemático na câmara triaxial (vista superior) e (b) fotografia das peças.	101
Figura 3.14 – Corte esquemático das peças internas à câmara triaxial, com esquema de montagem.	102
Figura 3.15 – Base do pedestal do corpo de prova: (a) desenho em corte, (b) fotografia – vista do topo e (c) fotografia – vista da base.	103
Figura 3.16 – Peça intermediária entre a base e o pedestal do corpo de prova: (a) desenho em corte, (b) fotografia – vista do topo e (c) fotografia – vista da base.	103
Figura 3.17 – Pedestal do corpo de prova: (a) desenho em corte, (b) fotografia – vista do topo e (c) fotografia – vista da base.	104
Figura 3.18 – Base e topo do corpo de prova: (a) desenho em perspectiva, (b) fotografia – vista do topo e da base (c) fotografia – vista lateral.	104
Figura 3.19 – Cabeçote do corpo de prova: (a) desenho em corte e (b) fotografia – vista do topo e (c) fotografia – vista da base.	105
Figura 3.20 - Cabeçote de transferência de carga: (a) desenho em corte e (b) fotografia – vista do topo e (c) fotografia – vista da base.	105

Figura 3.21 - Desenho esquemático (vista superior) com identificação das peças do sistema de medição de torque.....	106
Figura 3.22 – Viga de torque: (a) desenho em corte e (b) fotografia – vista do topo, com os pistões de torque acoplados.	106
Figura 3.23 – Viga de torque fixada ao cabeçote de transferência de carga. No centro é acoplado o rolamento de dupla carreira de esferas.....	107
Figura 3.24 – Corpo de prova teste confeccionado em nylon – (a) desenho esquemático, (b) fotografia.	107
Figura 3.25 – Compressor de ar <i>Kaeser SX 7</i> e reservatório <i>Chiaperini</i> de 360 l.....	110
Figura 3.26 – Painel pneumático para controle das pressões de ar aplicadas.	111
Figura 3.27 - (a) o <i>Spider 8</i> , (b) quadro de conectores, (c) conectores de 15 pinos e (d) conectores de 5 pinos.....	113
Figura 3.28 – Tela de visualização do ensaio <i>hollow cylinder torsional</i>	114
Figura 3.29 – Células de carga: (a) <i>HBM</i> modelo <i>PW12BC3</i> e (b) <i>HBM</i> modelo <i>SP4C3</i>	115
Figura 3.30 – Vista frontal do posicionamento do transdutor que mede o deslocamento axial, no equipamento <i>hollow cylinder torsional</i>	116
Figura 3.31 – Vista superior do posicionamento do transdutor que mede o deslocamento circunferencial, no equipamento <i>hollow cylinder torsional</i>	117
Figura 3.32 – (a) Transmissor de pressão <i>ASCHCROFT</i> modelo <i>K1</i> e (b) fonte <i>NOVUS</i> modelo <i>24 V</i>	118
Figura 4.1 - A região de ocorrência de rochas sedimentares do Juracretáceo, onde se insere a Formação Botucatu (na cor marrom), e, no detalhe, a localização da área de estudo (IBGE, 2001; FCEyN/UBA, 1999), apresentada por Martins (2001).....	120
Figura 4.2 - Perfil de solo residual de arenito Botucatu da Vila Scharlau (Martins, 2001). ..	121
Figura 4.3 - Curva granulométrica do solo residual de arenito Botucatu.....	124
Figura 4.4 - Curvas granulométricas do solo residual de arenito Botucatu da mesma jazida, mas obtidas por diversos autores.	125
Figura 4.5 - Curvas de compactação do solo residual de arenito Botucatu determinadas nas energias normal e intermediária.	126
Figura 4.6 – Típica curva de compactação para areias sem coesão (Foster, 1962 <i>apud</i> Lambe e Whitman, 1979).....	127
Figura 4.7 – Corpo de prova de solo residual de arenito Botucatu, compactado para ensaio triaxial.....	132
Figura 4.8 - Ensaio triaxial de carga repetida para determinação do módulo de resiliência em um corpo de prova compactado de solo residual de arenito Botucatu.	132
Figura 4.9 – Comportamento típico quanto às deformações permanentes.....	133
Figura 4.10 – Resultado típico de ensaios triaxiais de deformações permanentes em multi-estágios, Malysz (2004).....	134
Figura 4.11 – Obtenção dos parâmetros ε_{pi} e <i>TDP</i> (Malysz, 2004).	135

Figura 4.12 – Base e topo do corpo de prova com as pedras porosas (a) e o papel filtro (b).	138
Figura 4.13 – Ranhura pra instalação da membrana interna no pedestal do corpo de prova.	139
Figura 4.14 – Ranhura para alojar o anel <i>O-ring</i> no molde externo.....	140
Figura 4.15 – Membranas interna e externa e moldes externo e interno do corpo de prova, posicionado no pedestal para o início da moldagem.....	140
Figura 4.16 – Compactação do solo por “pisoteamento”.....	140
Figura 4.17 – Marcação da posição das palhetas no topo do corpo de prova antes da cravação da peça de topo.	141
Figura 4.18 – Instalação do corpo de prova na câmara triaxial: (a) com o molde externo e (b) após retirada do molde.....	142
Figura 4.19 – Variação da pressão de ar no cilindro de carga axial durante o ensaio <i>hollow cylinder</i>	146
Figura 4.20 – Estado de tensões em um corpo de prova <i>hollow cylinder torsional</i> representado círculo de Mohr.	149
Figura 4.21 – Gráfico da pressão de ar aplicada no cilindro <i>Bellofram</i> da carga axial versus a tensão desvio obtida em ensaio <i>hollow cylinder</i> no corpo de prova teste.	151
Figura 4.22 – Gráfico da pressão de ar no cilindro <i>Bellofram</i> da carga axial versus a tensão desvio obtida nos ensaios <i>hollow cylinder</i> realizados no corpo de prova teste e em corpos de prova de solo, com reta de ajuste da média dos resultados.	151
Figura 5.1 – Módulo de resiliência em função da pressão confinante, com ajuste para solos arenosos (DNER – ME 131/94).....	154
Figura 5.2 - Módulo de resiliência em função da tensão desvio, com ajuste para solos argilosos e siltosos (DNER – ME 131/94).	154
Figura 5.3 – Modelo tridimensional do módulo de resiliência em função da pressão confinante e da tensão desvio, gerado pelo <i>software STATISTICA</i>	156
Figura 5.4 – Módulos de resiliência, segundo o ajuste para solos arenosos do método proposto pelo DNER, apresentados por diferentes autores.	157
Figura 5.5 – Evolução da deformação permanente com o número de aplicações de carga para três níveis de pressão confinante.	158
Figura 5.6 – Valores de ε_{pi} em função de σ_d para cada σ_3 aplicado.....	160
Figura 5.7 – Valores de <i>TDP</i> em função de σ_d para cada σ_3 aplicado.	160
Figura 5.8 – Gráfico das pressões aplicadas no ensaio e deslocamentos medidos versus o tempo. Corpo de prova teste, ensaio estático.....	163
Figura 5.9 – Gráfico da tensão desvio, tensão axial e deslocamento axial versus tempo; corpo de prova teste, ensaio estático.....	164
Figura 5.10 – Pulsos de carga e deslocamento versus tempo em ensaio com carregamento cíclico no corpo de prova teste.	165
Figura 5.11 – Gráfico tensão desvio (σ_d) e deformação axial (ε) versus tempo do período inicial do ensaio EST 3.....	167

Figura 5.12 – Gráfico das leituras das células de carga de torque (CC tq 2 e CCtq 1) e transdutor de deslocamento circunferencial ($\Delta\theta$) versus o tempo, com indicação das variações no ensaio EST4.....	169
Figura 5.13 – Superfície de ruptura ocasionada pela aplicação de torque no ensaio EST4... 171	171
Figura 5.14 – Gráfico das pressões de ar aplicadas no corpo de prova e os deslocamentos axial (Δh) e circunferencial ($\Delta\theta$) versus o tempo, no ensaio EST5.....	172
Figura 5.15 – Gráfico das tensões e deformações versus o tempo, aplicadas no ensaio EST6.	174
Figura 5.16 – Gráfico da rotação das tensões principais (α) versus a deformação cisalhante no ensaio EST6.....	175
Figura 5.17 – Gráfico das tensões e deformações versus o tempo, aplicadas no ensaio EST 7.	176
Figura 5.18 – Gráfico da rotação das tensões principais (α) versus a deformação cisalhante (γ) no ensaio EST 7.....	177
Figura 5.19 – Gráfico das tensões e deformações versus o tempo, aplicadas no ensaio EST 8.	179
Figura 5.20 – Gráfico da rotação das tensões principais (α) versus a deformação cisalhante no ensaio EST 8.....	179
Figura 5.21 – Estado de tensões no ensaio EST8, representado pelo círculo de Mohr correspondente ao último incremento de torque do primeiro ciclo de aplicação com sentido horário.....	180
Figura 5.22 – Pulsos de deslocamento axial versus tempo no ensaio CIC1.....	181
Figura 5.23 – Pulsos de deslocamento axial versus tempo no ensaio CIC1, destacando o detalhe do aumento de deslocamento axial com a aplicação de torque.....	181
Figura 5.25 – Pulsos de deslocamento axial e circunferencial versus o tempo no ensaio CIC2.	184
Figura 5.26 – Deformação permanente versus número de ciclos do ensaio CIC3.....	185
Figura 5.27 – Deformação permanente versus número de ciclos do ensaio CIC4.....	185
Figura 5.28 – Deformação permanente versus número de ciclos dos ensaios: CIC5 no equipamento <i>hollow cylinder torsional</i> (HCT) e triaxial no equipamento convencional.	188
Figura 5.29 – Deformação permanente versus número de ciclos dos ensaios CIC 4 (com torque) e CIC5 (sem torque).....	188

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 2.1 – Ensaio de laboratório capazes de realizar a rotação do plano das tensões principais.	25
Quadro 2.2 – Equações para a determinação das tensões médias e deformações médias (Hight <i>et al.</i> 1983).	31
Quadro 2.3 – Equações para a determinação das tensões médias Vaid <i>et al.</i> (1990).	32
Tabela 2.1 – Resistência à compressão simples do solo residual de arenito Botucatu, determinada por Martins (2001) e Núñez (1991).	81
Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas de um solo residual de arenito Botucatu, relevantes à pavimentação (Núñez, 1991).	82
Tabela 2.3 - Composição modal do solo residual de arenito Botucatu (Martins, 2001).	84
Tabela 4.1 - Índices físicos do solo residual de arenito Botucatu, determinados em laboratório.	123
Tabela 4.2 - Índices físicos do solo residual de arenito Botucatu, obtidos por outros autores na mesma região de amostragem.	124
Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de compactação.	126
Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios ISC.	127
Tabela 5.1 – Equações para determinação do módulo de resiliência de acordo com os modelos propostos pelo método de ensaio DNER – ME 131/94.	155
Tabela 5.2 – Parâmetros dos modelos de ajuste apresentados na Figura 5.4.	157
Tabela 5.3 - Parâmetros do modelo de deformações permanentes.	158
Tabela 5.4 – Pressões aplicadas no ensaio estático do corpo de prova teste.	163
Quadro 5.1 – Quadro geral das características dos ensaios no equipamento <i>hollow cylinder torsional</i> com carregamento axial estático.	170
Tabela 5.5 – Estados de tensão e deformação aplicados no corpo de prova do ensaio EST6.	173
Tabela 5.6 – Estados de tensão e deformação aplicados no corpo de prova do ensaio EST7.	175
Tabela 5.7 – Estados de tensão e deformação aplicados no corpo de prova do ensaio EST8.	178
Quadro 5.2 – Quadro geral das características dos ensaios no equipamento <i>hollow cylinder torsional</i> com carregamento axial cíclico.	182
Tabela 5.8 – Estados de tensões dos estágios do ensaio CI4.	185

LISTA DE SIMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

α	ângulo da tensão principal maior com a vertical
σ_1	tensão principal maior
σ_2	tensão principal intermediária
σ_3	tensão principal menor
σ_θ	tensão circunferencial
σ_r	tensão radial
σ_d	tensão desvio
σ_z	tensão axial
σ_c	tensão confinante
$\tau_{z\theta}, \tau_{\theta z}$	tensão cisalhante desenvolvida pelo torque no corpo de prova HCT
b	$(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$
p	$(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$
q	$(\sigma_1 - \sigma_3)/2$
η	q/p
p_e	pressão externa aplicada no corpo de prova HCT
p_i	pressão interna aplicada no corpo de prova HCT
r_e	raio externo do corpo de prova HCT
r_i	raio interno do corpo de prova HCT
$\gamma_{\theta z}$	deformação cisalhante
ϵ_z	deformação axial
ϵ_r	deformação radial
ϵ_θ	deformação circunferencial
u	deslocamento na direção radial
h	altura do corpo de prova
Δh	variação da altura do corpo de prova
θ	ângulo que corresponde ao giro da base do corpo de prova HCT
$\Delta\theta$	deslocamento circunferencial (mm)
p_a	pressão de ar axial
p_t	pressão de ar de torque
p_c	pressão confinante
β_1	diferença entre as tensões médias real e calculada
β_3	nível de não uniformidade de tensões (Hight <i>et al.</i> , 1983)
R	σ_1 / σ_3
β_R	nível de não uniformidade de tensões (Vaid <i>et al.</i> , 1990)
τ_{zy}, τ_{yz}	tensões radiais cisalhantes
ν	coeficiente de Poisson
$\alpha_{\Delta\epsilon}$	inclinação do incremento de deformação principal maior
$\alpha_{\Delta\sigma}$	inclinação do incremento de tensão principal maior
γ_d	peso específico aparente seco
γ_{dmax}	peso específico aparente seco máximo
γ_s	peso específico real dos grãos
ω_{otm}	teor de umidade ótimo
ω	teor de umidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
ISC _{max}	Índice de Suporte Califórnia máximo

ω_{ISCmax}	teor de umidade para o Índice de Suporte Califórnia máximo
$ISC_{\omega_{ot}}$	Índice de Suporte Califórnia na umidade ótima
RCS	resistência à compressão simples
IP	índice de plasticidade
LL	limite de liquidez
LP	limite de plasticidade
MR	módulo de resiliência
k_1, k_2	parâmetros do modelo para calculo do MR em solos arenosos.
k_3, k_4	parâmetros do modelo para calculo do MR em solos argilosos e siltosos.
OCR	<i>Overconsolidate ratio</i> (razão de sobre adensamento)
HCT	<i>hollow cylinder torsional</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagens
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials

RESUMO

A maior parte das solicitações que ocorrem em campo, devidas a obras geotécnicas, está associada à rotação das tensões principais no interior do solo. Muitos equipamentos de ensaios de laboratório tentam simular estas condições, mas o único que possibilita o controle da magnitude e da direção das tensões principais é o equipamento *hollow cylinder torsional*. Sua utilização vem sendo cada vez mais freqüente em todo o mundo, pois é o equipamento de laboratório mais completo na simulação de condições de campo. Um equipamento *hollow cylinder torsional* foi projetado e construído na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) como parte desta tese, visando a investigação do comportamento mecânico de materiais de pavimentação. O desenvolvimento deste equipamento incluiu seu projeto, usinagem de peças, aquisição de componentes, montagem e ensaios de calibração. Sua concepção e fundamentação teórica foram baseadas em trabalhos pioneiros sobre ensaios *hollow cylinder torsional* realizados no *Imperial College da Universidade de Londres*, nos anos 80, e na *Universidade de Nottingham*, nos anos 90.

O material empregado no programa experimental desta tese é um solo residual de arenito Botucatu compactado. Além dos ensaios convencionais para caracterização do material, foram realizados ensaios triaxiais de carga repetida, para determinação dos módulos de resiliência e das deformações permanentes deste solo, na modalidade multi-estágio. No equipamento *hollow cylinder torsional* foram realizados ensaios com carga estática e rotação do plano de tensões principais e ensaios com carga cíclica, com e sem rotação do plano de tensões principais. Os ensaios de carga cíclica para avaliar as deformações permanentes apresentaram boa resposta quando comparados aos ensaios triaxiais e mostraram que a deformação permanente axial aumenta quando é aplicada a rotação no plano de tensões principais. A aplicação de torque no corpo de prova neste tipo de ensaio, mesmo quando realizada na modalidade não cíclica, apresenta uma aproximação mais real do comportamento de campo que os ensaios triaxiais de carga repetida convencionais. Além da montagem do equipamento *hollow cylinder torsional*, um dos objetivos desta tese foi validar este equipamento, o qual pode ser considerado apto ao funcionamento. A disponibilidade deste equipamento abre um amplo horizonte para pesquisas futuras, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sobre o comportamento geotécnico de solos submetidos às mais variadas solicitações.

ABSTRACT

Most of in situ solicitations due to geotechnical works is associated to soils principal stresses rotation. Several laboratory equipments try to simulate principal stresses rotation, but only the hollow cylinder torsional apparatus allows controlling the magnitude and directions of principal stresses in soils. This equipment, which is the most complete available to simulate in situ stresses states, is becoming more and more used all over the world. As a part of this PhD thesis, a hollow cylinder torsional apparatus was designed and assembled at the Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil, with the purpose of studying the mechanical behavior of paving materials. The hollow cylinder torsional apparatus included its design, the production and assemblage of pieces, as well as calibration tests. The equipment conception and theoretical fundamentals were based in former works carried out at the Imperial College of Science and Technology at London, in the years 1980, and at the University of Nottingham, in the following decade. The material used for testing was a sandstone residual soil. Besides conventional geotechnical characterization, multistage triaxial repeated loading tests were carried out to obtain resilient modulus models and permanent deformation characteristics. The hollow cylinder torsional apparatus tested compacted specimens under static and repeated loading, applying principal stresses rotation. Repeated loading tests for evaluating permanent deformations were successfully carried out, confirming the increase of axial permanent deformation due to principal stress rotation. The torsion applied to the specimen in this type of test, even under static loading, better simulates in situ conditions than conventional repeated loading tests. Besides the design and assemblage of the hollow cylinder torsional apparatus the experimental work carried out for this thesis, allowed overcoming difficulties that appear when a complex device is firstly put into operation. The availability of such equipment at the Federal University of Rio Grande do Sul broadens the horizon of researches that will be carried out in future days on the geotechnical behavior of soils submitted to various stress states.

1 INTRODUÇÃO

Uma característica relevante da associação das trajetórias de tensão seguidas pelo solo com as condições de carregamento em campo, devidas a obras geotécnicas, é a rotação da direção das tensões principais, associada com variações em sua magnitude. Qualquer trajetória de tensões aplicada com um equipamento de ensaio triaxial convencional não considera os efeitos da rotação das tensões principais. Isto não está relacionado com restrições do método de análise de tensões, mas sim com restrições do equipamento que não consegue simular esta característica particular das trajetórias de tensão.

O *hollow cylinder torsional* é um equipamento para ensaios geotécnicos de laboratório que combina a aplicação de carregamento axial, torque e pressões internas e externas, tornando assim possível o controle da direção das tensões principais em uma superfície submetida a estados de tensões controlados. Neste equipamento, a magnitude e a direção das tensões principais maior e menor pode ser controlada, juntamente com a magnitude da tensão principal intermediária.

Somente por meio da simulação da rotação das tensões principais é possível reproduzir com maior fidelidade, em laboratório, o comportamento geotécnico dos solos em diversos tipos de solicitações, como por exemplo, em camadas de pavimentos submetidos ao carregamento imposto pelo tráfego de veículos. Neste tipo de solicitação, a rotação das tensões principais nas diferentes camadas de pavimento influencia diretamente no acúmulo de deformações plásticas, que são muito importantes na avaliação do comportamento global de um pavimento. A simulação deste tipo de comportamento geomecânico no equipamento *hollow cylinder torsional* traz novas perspectivas à pesquisa em infra-estrutura de transportes no Brasil, permitindo assim investigar um leque mais amplo de condições de carregamento e parâmetros que não eram possíveis nos equipamentos triaxiais tradicionalmente utilizados.

1.1 Objetivos da pesquisa

O principal objetivo desta tese foi projetar, montar e validar um equipamento *hollow cylinder torsional* no Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O equipamento foi desenvolvido e construído com recursos CNPq - Edital Universal. Sua concepção e fundamentação teórica basearam-se em trabalhos pioneiros sobre ensaios *hollow*

cylinder torsional realizados no *Imperial College of Science, Technology and Medicine, da University of London*, a partir dos anos 80, e na *University of Nottingham*, nos anos 90.

Para promover a validação deste equipamento foram realizados diferentes tipos de ensaios, com aplicação de carregamento axial estático e cíclico, e aplicação de tensão cisalhante no corpo de prova. Os ensaios estáticos foram realizados para avaliar a resposta do equipamento *hollow cylinder torsional* à aplicação da rotação das tensões principais em um corpo de prova de solo, enquanto os cíclicos foram realizados para verificar o comportamento quanto às deformações permanentes em um corpo de prova submetido a tensões cisalhantes. Devido à complexidade relacionada ao desenvolvimento do equipamento e à interpretação de seus resultados, optou-se por realizar um programa experimental compacto e com um material de fácil acesso e comportamento conhecido. O solo residual de arenito Botucatu tem sido estudado por vários pesquisadores do PPGEC/UFRGS. O conhecimento do seu comportamento geotécnico auxiliou na escolha do método de moldagem do corpo de prova e na verificação do funcionamento do equipamento *hollow cylinder torsional*.

1.2 Estrutura da tese

Esta tese foi dividida em 6 capítulos, a contar da introdução, além de referências bibliográficas e um anexo, onde são apresentados todos os desenhos referentes ao projeto e montagem do equipamento *hollow cylinder torsional*, contendo as dimensões e especificações das peças que o compõem.

O Capítulo 2 desta tese consiste em uma revisão bibliográfica sobre ensaios *hollow cylinder torsional*, onde são apresentados: (i) a fundamentação teórica desses ensaios; (ii) aplicações do equipamento *hollow cylinder torsional* na simulação de diferentes solicitações de campo; e (iii) um panorama geral sobre a existência e a utilização deste tipo de equipamento em diferentes países. São revisados também trabalhos anteriores sobre o comportamento de materiais granulares em camadas de pavimentos e as propriedades geotécnicas do solo residual de arenito Botucatu.

O Capítulo 3 apresenta em detalhe a concepção estrutural do equipamento *hollow cylinder torsional* construído nesta tese com as características de todas as peças que o compõem. São apresentados, também, o sistema pneumático para aplicação de pressões no ensaio *hollow cylinder* e o sistema de aquisição automática de dados utilizado.

A caracterização do material estudado e os métodos de ensaio são apresentados no Capítulo 4. A metodologia utilizada para moldagem dos corpos de prova para os ensaios *hollow cylinder* é descrita em detalhe, porém o procedimento de ensaio é apresentado de maneira resumida. Como os ensaios apresentados nesta tese foram os primeiros realizados no equipamento *hollow cylinder torsional* construído, os procedimentos de aplicação de cargas e de interpretação de resultados somente foram definidos à medida que os próprios ensaios se desenvolveram, e são apresentados juntamente com os resultados.

O Capítulo 5 apresenta e analisa os resultados dos ensaios de laboratório realizados no solo residual de arenito Botucatu compactado. Ensaio triaxiais de carregamento cíclico precederam a realização dos ensaios no equipamento *hollow cylinder torsional*. Resultados de módulo de resiliência determinados no equipamento triaxial foram apresentados com diferentes modelos de ajuste. Os resultados dos ensaios de deformação permanente, realizados em ambos os equipamentos, são comparados. Os ensaios *hollow cylinder torsional* são apresentados e analisados com ênfase na validação do equipamento.

As conclusões obtidas com o desenvolvimento do equipamento e o programa experimental desta tese são apresentadas no Capítulo 6. As sugestões para futuros trabalhos enfatizam alguns melhoramentos no equipamento *hollow cylinder torsional* construído e o amplo horizonte que a disponibilidade deste equipamento abre para a realização de pesquisas na área geotécnica, particularmente nos temas relacionados à pavimentação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um dos principais objetivos da mecânica dos solos é o estudo do comportamento do solo em resposta às diferentes solicitações que lhes são impostas. Ensaio em campo, simulações em laboratório, novas formulações e modelagens numéricas são as principais ferramentas utilizadas na busca da solução de problemas geotécnicos. Com o avanço da tecnologia e do estado do conhecimento nessa área, o fenômeno da rotação do plano de tensões principais que ocorre em campo, se tornou um dos principais objetos de estudo da mecânica dos solos nas últimas décadas.

2.1 A rotação do plano de tensões principais

A rotação do plano de tensões principais no solo pode ser consequência de fenômenos naturais (abalos sísmicos, movimentações de terra, variações nas correntes marítimas, feições estruturais da formação do solo) ou de obras de engenharia, como exemplifica a Figura 2.1 (onde, α é o ângulo de rotação da tensão principal maior em relação à vertical e σ_1 , σ_2 , e σ_3 , são as tensões principais maior, intermediária e menor, respectivamente). Leroueil e Hight (2002) ilustram o que ocorre com o plano de tensões principais em uma camada de solo solicitada por uma carga com distribuição circular. A Figura 2.2a apresenta os contornos de $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3 / 2p$, onde $\Delta\sigma_1$ e $\Delta\sigma_3$ são os incrementos das tensões principal maior e menor, respectivamente, e p é a tensão vertical aplicada em uma área circular na superfície do solo. Outra maneira de representar a mesma situação é através da variação da direção dos incrementos das tensões principais maior e menor e a magnitude do incremento da tensão principal intermediária. A Figura 2.2b mostra os contornos da direção de σ_1 , representados pelo ângulo α , e a Figura 2.2c mostra os contornos da variação de b^1 ($\Delta b = (\Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_3) / (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$). A Figura 2.3 também exemplifica uma situação de campo, a variação de α ao longo da superfície de ruptura de uma saia de aterro, apresentada por Leroueil e Hight (2002).

¹ Parâmetro que expressa a variação da magnitude da direção principal intermediária, apresentado em detalhes no item 2.2.1.

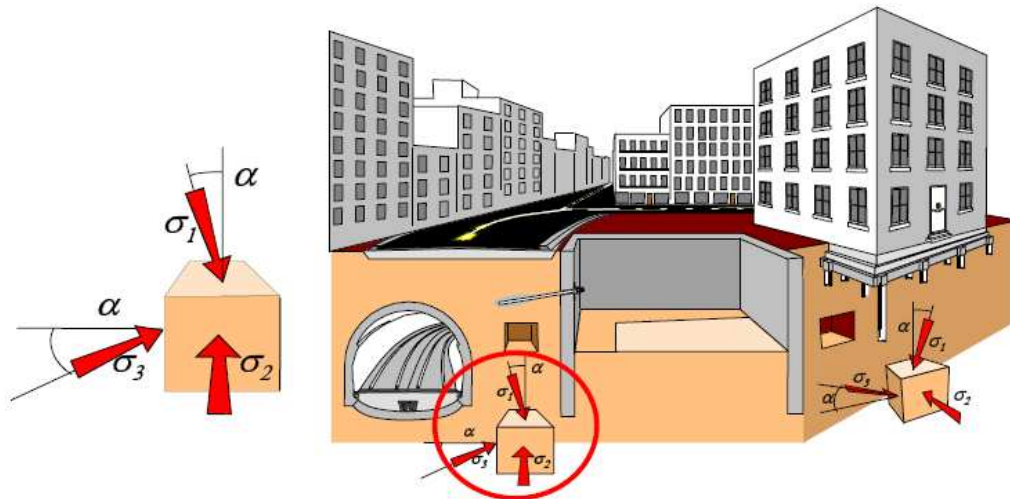


Figura 2.1 – Exemplos de rotação das tensões principais em obras geotécnicas de ambientes urbanos (Nasreddine, 2004).

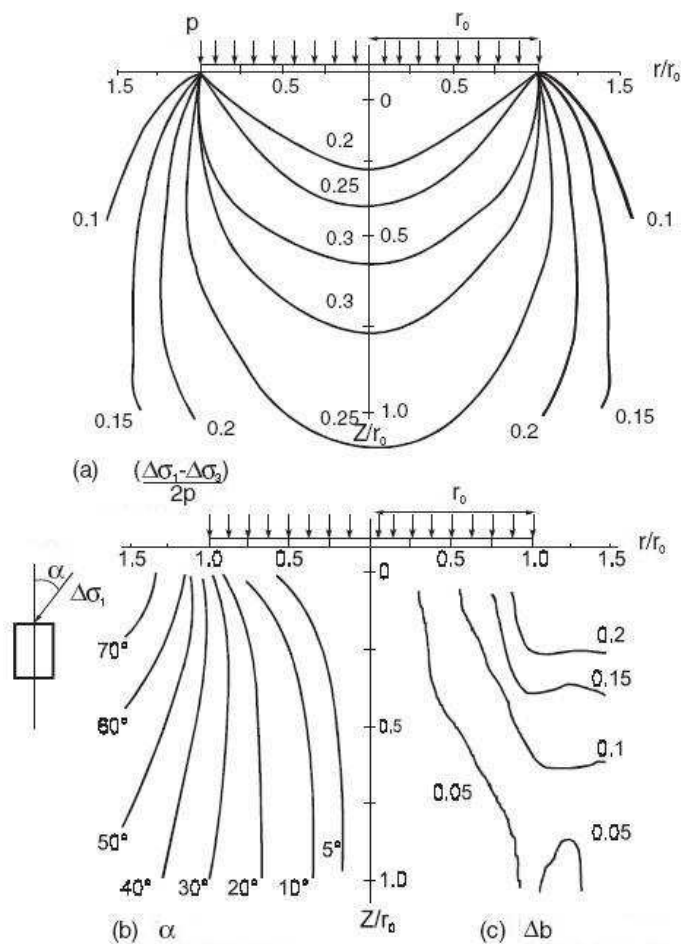


Figura 2.2 – Exemplos de diferentes representações das tensões ocasionadas por um carregamento circular no solo: (a) contornos de $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3 / 2p$. (b) contornos de α , (c) contornos de b (Leroueil e Hight, 2002).

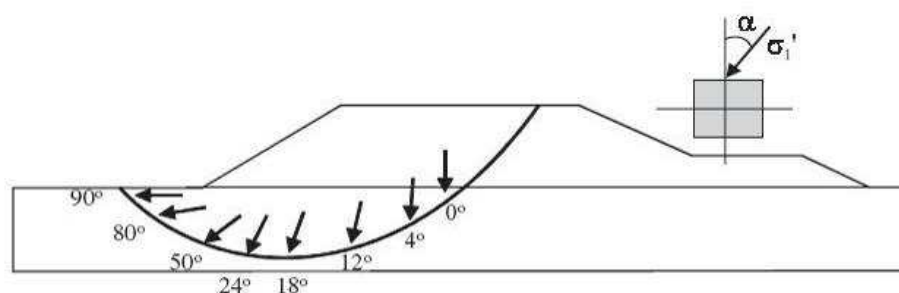


Figura 2.3 – variação de α ao longo de uma superfície de ruptura de um aterro (Leroueil e Hight, 2002).

Para associar trajetórias de tensão em elementos no interior do solo com as condições de carregamento em campo, deve-se considerar a rotação da direção das tensões principais associada com variações em sua magnitude. Esta rotação aumenta quando a direção do incremento da tensão não coincide com a direção da tensão principal. A Figura 2.4 ilustra este efeito da rotação das tensões principais em um elemento de solo.

A rotação da direção das tensões principais pode ser simulada em laboratório através de muitos tipos de equipamentos e ensaios. O Quadro 2.1 apresenta os equipamentos de laboratório que possibilitam o estudo da rotação das tensões principais, divididos em dois grupos. No primeiro grupo estão os ensaios onde a direção das tensões principais é fixa em 0° ou 90° , e no segundo grupo, os ensaios que possibilitam a rotação das tensões principais durante o ensaio. Para cada ensaio são apresentados os parâmetros que podem ser controlados, um desenho esquemático com a aplicação de tensões durante o ensaio e suas respectivas referências, onde podem ser encontrados mais detalhes sobre suas metodologias, aplicações e limitações.

O *hollow cylinder torsional* é o único equipamento que combina carregamento axial, torque e pressões interna e externa em um corpo de prova de solo de forma tubular, submetido a condições de tensões controladas, tornando possível o controle da direção das tensões principais em uma superfície. Este equipamento oferece a oportunidade de incluir, na trajetória de tensões, a rotação das tensões principais. A magnitude e a direção das tensões principais maior e menor pode ser controlada junto com a magnitude da tensão principal intermediária.

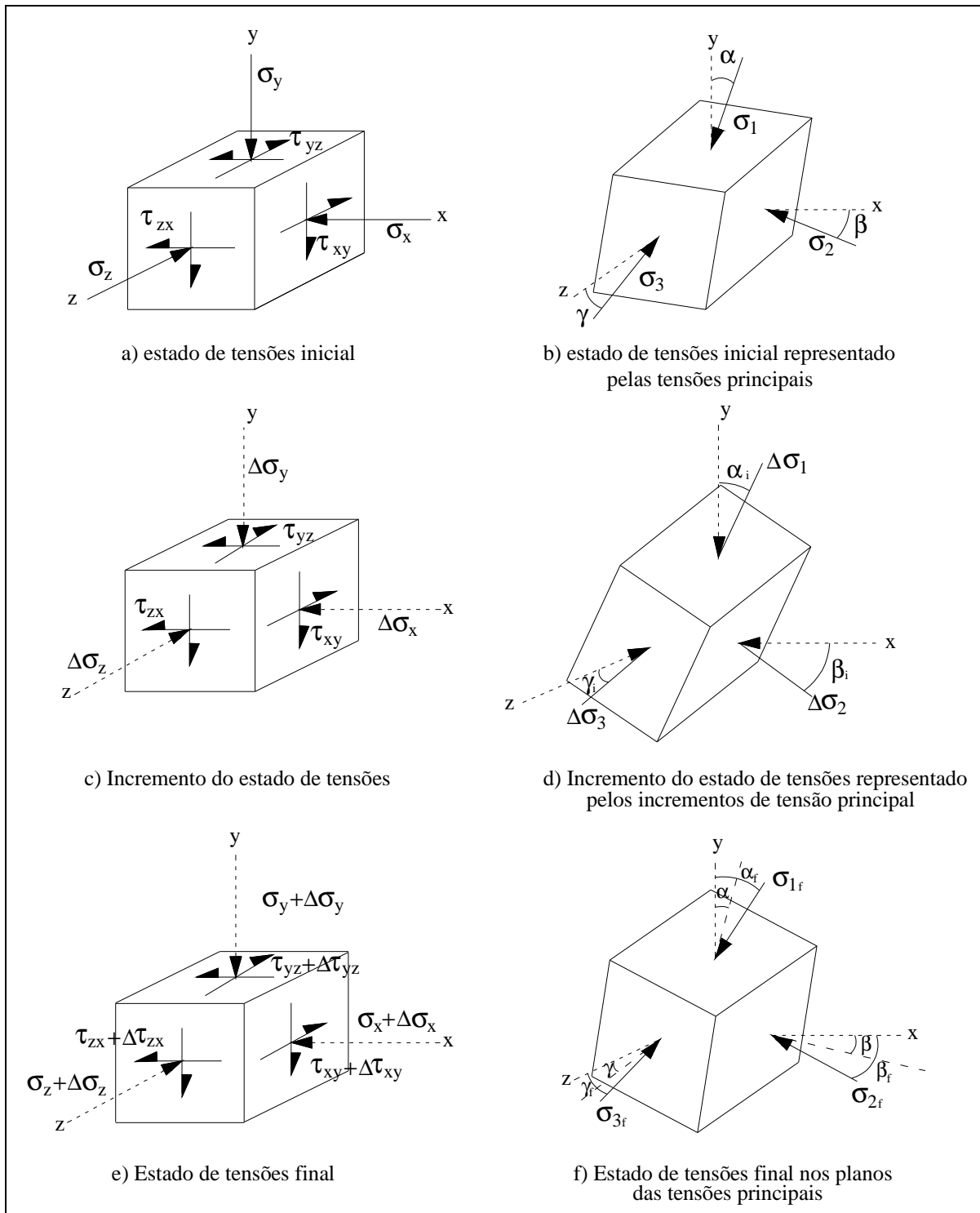
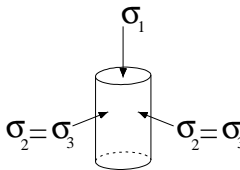
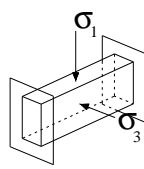
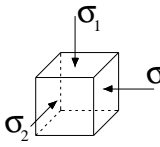
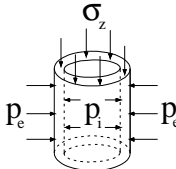
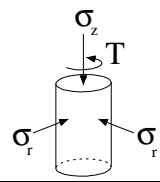
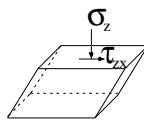
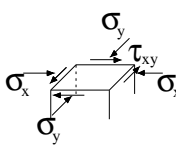
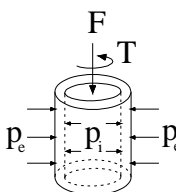


Figura 2.4- Rotação das tensões principais em um elemento de solo.

Quadro 2.1 – Ensaio de laboratório capazes de realizar a rotação do plano das tensões principais.

Método de Ensaio	Controle das tensões principais	Condições impostas pelo ensaio	Referência	
Direção das tensões principais fixa (0° ou 90°)	<i>Triaxial</i>	σ_1 σ_3		Bishop e Wesley (1975)
	<i>Plane strain triaxial</i>	σ_1 σ_3		Campanella e Vaid (1973)
	<i>True triaxial</i>	σ_1 σ_2 σ_3		Ko e Scott (1967)
	<i>Hollow cylinder triaxial</i>	σ_1 σ_2 σ_3		Broms e Ratman (1963)
Direção das tensões principais pode ser rotacionada	<i>Torsional triaxial</i>	σ_1 σ_2 σ_3		Saada e Baah (1967)
	<i>Simple shear</i>			Roscoe (1953)
	<i>Directional shear cell</i>	σ_1 σ_3 α		Arthur <i>et al.</i> (1980)
	<i>Hollow cylinder torsional</i>	σ_1 σ_2 σ_3 α		Hight <i>et al.</i> (1983)

2.2 Ensaio *hollow cylinder torsional*

2.2.1 Princípios do ensaio *hollow cylinder torsional*

Em um corpo de prova de forma tubular, são aplicados carregamento axial (F) e torque (T) no eixo central e vertical e pressões radiais interna (p_i) e externa (p_e), conforme mostra a Figura 2.5a. O torque desenvolve as tensões cisalhantes $\tau_{\theta z}$ e $\tau_{z\theta}$ nos planos verticais e horizontais; a carga axial F contribui para a tensão vertical σ_z . A diferença entre p_e e p_i é a tensão radial σ_r , através da parede do cilindro. A tensão circunferencial σ_θ é então diferente de σ_r como mostra a Equação 2.1.

$$\sigma_\theta - \sigma_r = r \frac{d\sigma_r}{dr} \quad (2.1)$$

As tensões que atuam em um elemento na parede do corpo de prova do ensaio *hollow cylinder* submetido a F , T , p_e e p_i são mostradas na Figura 2.5b. Neste ensaio, p_e e p_i são aplicadas através de uma membrana flexível, que não transfere tensões cisalhantes em sua superfície vertical. Desconsiderando os efeitos das restrições de extremidade, não existem tensões cisalhantes nas superfícies circunferenciais da parede do corpo de prova e a tensão radial é sempre a tensão principal σ_2 . As tensões σ_z , σ_θ , $\tau_{z\theta}$ e $\tau_{\theta z}$, podem ser utilizadas para a determinação das magnitudes e direções das tensões principais σ_1 e σ_3 (Figuras 2.5c e 2.5d).

Geralmente, as tensões não são uniformes ao longo das paredes do corpo de prova e para considerar o corpo de prova do ensaio *hollow cylinder* como um elemento único é necessário trabalhar em termos de tensões médias $\bar{\tau}_{\theta z}$, $\bar{\sigma}_z$, $\bar{\sigma}_\theta$ e $\bar{\sigma}_r$.

No caso particular da pressão interna ser igual à pressão externa ($p_i = p_e = p$) é usual supor que $\bar{\sigma}_r$ e $\bar{\sigma}_\theta$ são iguais a p . Variações em $\bar{\tau}_{\theta z}$, $\bar{\sigma}_z$, $\bar{\sigma}_\theta$ e $\bar{\sigma}_r$ produzem variações na magnitude e na orientação de $\bar{\sigma}_1$ e $\bar{\sigma}_3$ e também variações no valor de $\bar{\sigma}_2$ (relativo às tensões $\bar{\sigma}_1$ e $\bar{\sigma}_3$). Para esta condição ($p_e = p_i$) pode ser utilizada a definição do parâmetro b , apresentada na Equação 2.2.

$$b = \frac{\bar{\sigma}_2 - \bar{\sigma}_3}{\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3} \quad (2.2)$$

Quando a pressão externa é diferente da pressão interna ($p_e \neq p_i$), o controle do parâmetro b e do ângulo α (ângulo de rotação da tensão principal maior em relação à vertical) deve ser independente, isto é, independente do controle das magnitudes de σ_1 , σ_2 e σ_3 e da orientação de σ_1 .

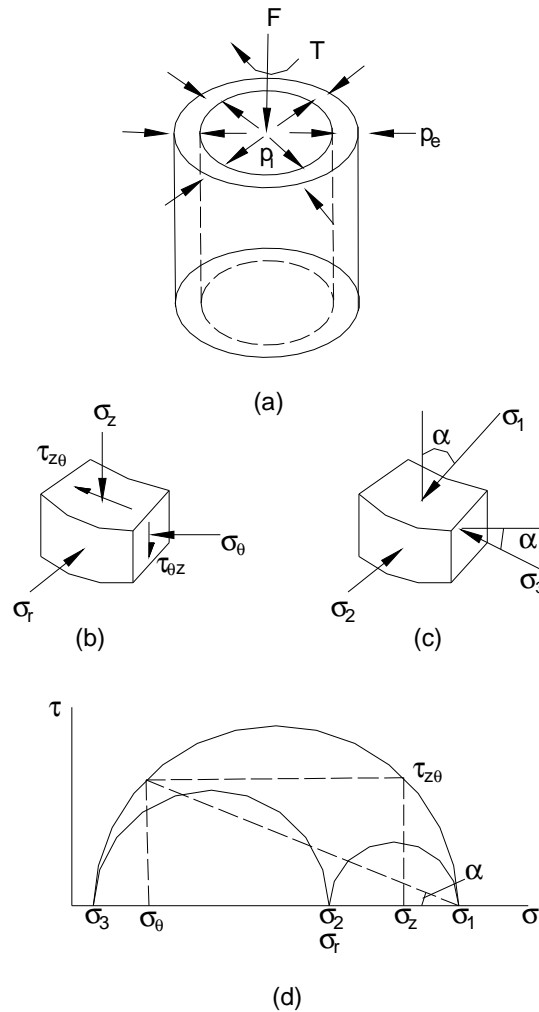


Figura 2.5 – Estado de tensão representado em um elemento de corpo de prova do ensaio *hollow cylinder* sujeito à carga axial (F), torque (T), pressão interna (p_i) e pressão externa (p_e): (a) corpo de prova *hollow cylinder*; (b) tensões em um elemento na parede do corpo de prova; (c) tensões principais em um elemento na parede do corpo de prova; (d) representação das tensões na parede do corpo de prova através do círculo de Mohr.

Para solos normalmente adensados a tensão vertical é maior que a tensão horizontal, e assim $\sigma_v = \sigma_1$ e $\sigma_h = \sigma_2 = \sigma_3 < \sigma_v$. Para solos fortemente pré-adensados, $\sigma_h > \sigma_v$ e $\sigma_h = \sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3 = \sigma_v$. Para expressar estas mudanças na magnitude da tensão principal intermediária, a relação expressa pela Equação 2.2 é aplicada. Quando são utilizadas estas definições é fácil concluir que, no caso de solos normalmente adensados, $b = 0$ e $\alpha = 0^\circ$, e, para solos pré-adensados, $b = 1$ e $\alpha = 90^\circ$. É aceitável que os valores de b para condições de deformação plana fiquem dentro da faixa $b = 0,3 \sim 0,5$ (Rollo, 2003).

As deformações também podem ser controladas no equipamento *hollow cylinder* durante o cisalhamento com rotação da tensão principal maior. As deformações em termos de coordenadas cilíndricas, em situações independentes de z e θ , são representadas pela deformação radial e pela deformação circunferencial, que podem ser definidas pelas Equações 2.3 e 2.4 respectivamente, onde u é o deslocamento de um ponto na direção radial.

$$\varepsilon_r = -\partial u / \partial r \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_\theta = u / r \quad (2.4)$$

Em um corpo de prova do ensaio *hollow cylinder*, a aplicação do torque causa rotação das tensões principais em superfícies concêntricas. A condição de deformação plana implica então na ausência de deformação na direção radial, isto é $\varepsilon_r = 0$. Esta condição é satisfeita, em média, assegurando deslocamentos iguais da parede interna e externa do cilindro.

Em uma discussão sobre os trabalhos de Hight *et al.* (1983) e Symes *et al.* (1984), Saada e Puccini (1985) criticam a validade do parâmetro b como um parâmetro de controle do estado de tensões durante o ensaio *hollow cylinder torsional*. Os autores dos artigos em discussão alegam que este parâmetro é válido sempre que a interpretação dos ensaios seja feita com quatro componentes no tensor de tensões ($\tau_{\alpha\alpha}$, σ_z , σ_θ e σ_r). Os autores relataram que os efeitos de σ_2 no comportamento dos solos já eram interpretados em termos de b por outros pesquisadores (Bishop, 1966; Ergun, 1981), o que pode ser verificado, também, na bibliografia mais atual (Rollo, 2003).

2.2.2 Distribuição de tensões em corpos de prova do ensaio *hollow cylinder*

A interpretação de ensaios realizados em um equipamento *hollow cylinder torsional* é feita através da consideração de que o corpo de prova é um elemento isolado e o cálculo dos valores de tensões e deformações médias é realizado através das equações apresentadas no Quadro 2.2 e ilustradas pela Figura 2.6 (Hight *et al.*, 1983).

Os valores de tensões médias, $\bar{\sigma}_z$ e $\bar{\sigma}_\theta$, são baseados em considerações de equilíbrio, e os valores de deformações médias, $\bar{\epsilon}_z$ e $\bar{\gamma}_{\theta z}$, são baseados apenas na compatibilidade de deformações, por isso, as expressões resultantes para o cálculo destas tensões e deformações são sempre válidas e independentes da lei constitutiva do material. As expressões utilizadas para tensões e deformações médias são baseadas na hipótese de distribuição de tensões linear elástica para $\bar{\sigma}_r$, na distribuição uniforme de tensões para $\bar{\tau}_{\theta z}$, e na variação linear do deslocamento radial através da parede do corpo de prova ($\bar{\epsilon}_r$ e $\bar{\epsilon}_\theta$). Deve ser observado que estas definições asseguram que $\sum \bar{\sigma}\bar{\epsilon}$ seja igual ao trabalho por unidade de volume causado pelas forças externas (Hight *et al.*, 1983).

Vaid *et al.* (1990) interpretam os ensaios *hollow cylinder torsional* com equações um pouco diferentes das apresentadas por Hight *et al.* (1983). Os autores supõem que o valor de $\bar{\sigma}_z$ também é independente das leis constitutivas do material e deve ser obtido apenas mediante condições de equilíbrio, mas para os demais componentes de tensão, a hipótese considerada é de uma distribuição linear elástica e isotrópica. As expressões de $\bar{\sigma}_\theta$, $\bar{\sigma}_r$ e $\bar{\tau}_{\theta z}$ foram obtidas pela média em relação ao volume do corpo de prova. A diferença entre as expressões propostas por Hight *et al.* (1983) e Vaid *et al.* (1990) ocorre em parte porque os primeiros autores utilizam a média em relação à espessura da parede do corpo de prova ao invés da média em relação ao volume. Também há divergência entre a hipótese adotada para a lei constitutiva do material, para o cálculo de $\bar{\tau}_{\theta z}$, pois Hight *et al.* (1983) adotam a hipótese de comportamento plástico enquanto Vaid *et al.* (1990) preferem adotar a hipótese de comportamento linear elástico. Sayão (1989) também propôs outras expressões relacionadas a estas interpretações, porém a diferença entre os resultados obtidos não ultrapassou 2%. O Quadro 2.3 apresenta as expressões propostas por Vaid *et al.* (1990) para o cálculo de $\bar{\sigma}_\theta$, $\bar{\sigma}_r$ e $\bar{\tau}_{\theta z}$. Para o cálculo de deformações, ambos os autores utilizam as mesmas expressões, apresentadas no Quadro 2.2.

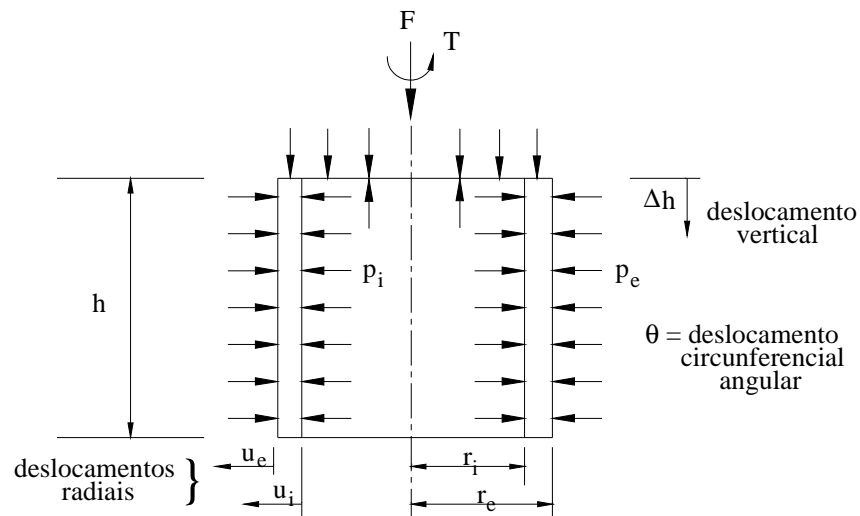


Figura 2.6 – Parâmetros envolvidos na determinação das tensões médias e deformações médias (Hight *et al.*, 1983).

Quadro 2.2 – Equações para a determinação das tensões médias e deformações médias (Hight *et al.* 1983).

Tensão vertical média:	$\bar{\sigma}_z = \frac{F}{\pi(r_e^2 - r_i^2)} + \frac{(p_e r_e^2 - p_i r_i^2)}{(r_e^2 - r_i^2)}$	(2.5)
------------------------	---	-------

Tensão radial média:	$\bar{\sigma}_r = \frac{(p_e r_e + p_i r_i)}{(r_e + r_i)}$	(2.6)
----------------------	--	-------

Tensão circunferencial média:	$\bar{\sigma}_\theta = \frac{(p_e r_e - p_i r_i)}{(r_e - r_i)}$	(2.7)
-------------------------------	---	-------

Tensão cisalhante média:	$\bar{\tau}_{\alpha} = \frac{3T}{2\pi(r_e^3 - r_i^3)}$	(2.8)
--------------------------	--	-------

Deformação axial média:	$\bar{\epsilon}_z = \frac{\Delta h}{h}$	(2.9)
-------------------------	---	-------

Deformação radial média:	$\bar{\epsilon}_r = -\frac{(u_e - u_i)}{(r_e - r_i)}$	(2.10)
--------------------------	---	--------

Deformação circunferencial média:	$\bar{\epsilon}_\theta = -\frac{(u_e + u_i)}{(r_e + r_i)}$	(2.11)
-----------------------------------	--	--------

Deformação cisalhante média:	$\bar{\gamma}_{\alpha} = \frac{2\theta(r_e^3 - r_i^3)}{3h(r_e^2 - r_i^2)}$	(2.12)
------------------------------	--	--------

Quadro 2.3 – Equações para a determinação das tensões médias Vaid *et al.* (1990).

Tensão radial média:	$\bar{\sigma}_r = \frac{(p_e r_e^2 - p_i r_i^2)}{(r_e - r_i)} - \frac{2(p_e - p_i)r_e^2 r_i^2 \ln(r_e / r_i)}{(r_e^2 - r_i^2)^2}$	(2.13)
Tensão circunferencial média:	$\bar{\sigma}_\theta = \frac{(p_e r_e^2 - p_i r_i^2)}{(r_e - r_i)} + \frac{2(p_e - p_i)r_e^2 r_i^2 \ln(r_e / r_i)}{(r_e^2 - r_i^2)^2}$	(2.14)
Tensão cisalhante média:	$\bar{\tau}_{\theta z} = \frac{4T(r_e^3 - r_i^3)}{3\pi(r_e^4 - r_i^4)(r_e^2 - r_i^2)}$	(2.15)

Existem alguns problemas no uso dos corpos de prova do ensaio *hollow cylinder*, que podem ser identificados e minimizados. Estes problemas estão relacionados à não uniformidade da distribuição de tensões (e também de deformações) através das paredes do corpo de prova, que surgem em função da sua curvatura, e das restrições nas extremidades (carregamentos nas extremidades).

2.2.2.1 Não-uniformidade de tensões devida à curvatura

Mesmo quando as tensões são uniformemente aplicadas e não existem restrições nas extremidades do corpo de prova do ensaio *hollow cylinder*, variações de tensão e deformação podem ocorrer ao longo da espessura da parede desse corpo de prova. Estas variações ocorrem quando é aplicado um torque ou uma diferença entre a pressão externa e a pressão interna. Diferenças entre p_e e p_i geram aumento na variação de σ_r e σ_θ através da parede do corpo de prova. O torque conduz à variação na tensão cisalhante $\tau_{\theta z}$ através da parede, que pode causar não-uniformidade em σ_z , σ_r e σ_θ , mesmo utilizando valores de p_i e p_e iguais. Em geral, a distribuição de tensão e deformação depende da lei constitutiva do material.

Se as tensões e deformações não puderem ser medidas diretamente através da parede do corpo de prova do ensaio *hollow cylinder*, é importante conhecer: (i) as diferenças entre as médias reais e calculadas, e (ii) a magnitude dos desvios das médias reais (o nível de não-uniformidade). Estas variáveis são verificadas em relação às forças e pressões aplicadas na superfície e, também, em relação aos deslocamentos e ângulos de rotação medidos externamente. A magnitude da diferença entre as tensões médias reais e calculadas pode ser caracterizada pelo parâmetro normalizado apresentado na Equação 2.16 (Hight *et al.*, 1983).

$$\beta_1 = \left(\overline{\sigma}^* - \overline{\sigma} \right) / \sigma_L \quad (2.16)$$

Para quantificar o nível de não-uniformidade de tensão, o parâmetro apresentado na Equação 2.17 é utilizado:

$$\beta_3 = \left(\int_a^b |\sigma(r) - \overline{\sigma}^*| dr \right) / (r_2 - r_1) \sigma_L \quad (2.17)$$

onde:

$\overline{\sigma}^*$ = média real;

$\overline{\sigma}$ = média calculada;

σ_L = medida do nível de tensão que é definido para cada caso;

$\sigma(r)$ = distribuição da tensão considerada através da parede do corpo de prova do ensaio *hollow cylinder*.

O parâmetro β_3 é uma medida da média de valores absolutos das diferenças entre a distribuição de tensões e a média real (ver Figura 2.7, Hight *et al.*, 1983). Definições similares para β_1 e β_3 são utilizadas para diferenças em deformações médias e para não-uniformidades de deformação.

As magnitudes de β_1 e β_3 são dependentes de: (i) geometria do corpo de prova, (ii) trajetória de tensões a ser seguida, (iii) diferença entre $\overline{\sigma}_r$ e $\overline{\sigma}_\theta$ e, conseqüentemente, a diferença de pressão através da parede do corpo de prova, e (iv) lei constitutiva do material.

A suposição de uma distribuição uniforme de tensão cisalhante através da parede do corpo de prova, que foi utilizada para o cálculo da tensão cisalhante média, pode ser adotada como um limitante para o caso elastoplástico, onde β_1 e β_3 são zero. Para o caso elástico linear, as variações de tensão cisalhante através da parede conduzem à relação entre β_1 , β_3 e r_i/r_e (raio interno/ raio externo do corpo de prova) apresentada na Figura 2.8 (Hight *et al.*, 1983).

Vaid *et al.* (1990) utilizaram um parâmetro diferente para quantificar o nível de não-uniformidade de tensões, apresentado na Equação 2.18. Este parâmetro é apresentado em termos de R (σ_1' / σ_3'), e segundo os autores, seu emprego em materiais granulares é mais eficiente em relação ao parâmetro β_3 , proposto por Hight *et al.* (1983).

$$\beta_R = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\text{medio}}} \quad (2.18)$$

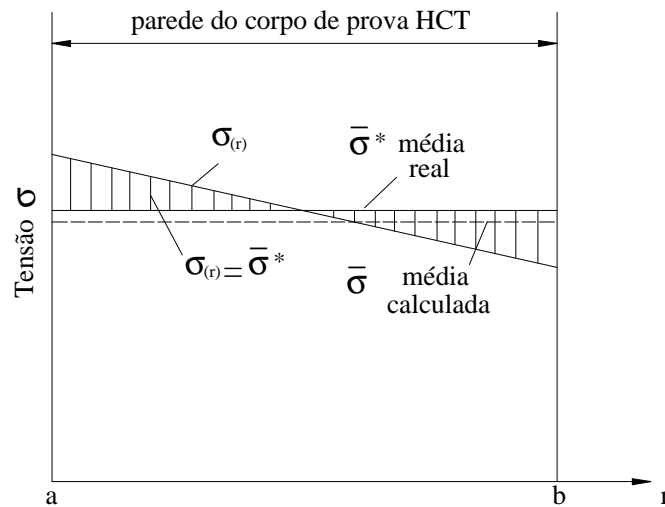


Figura 2.7 – Definições utilizadas para avaliar a não-uniformidade de tensões (Hight *et al.*, 1983).

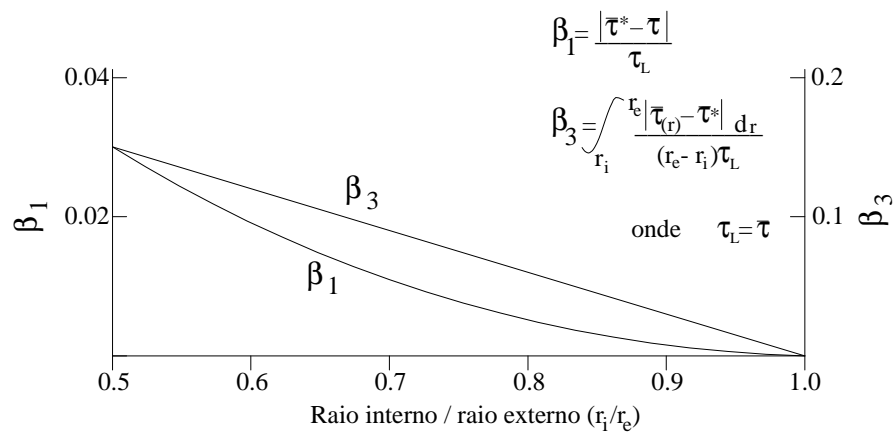


Figura 2.8 – Variação da não-uniformidade de tensões cisalhantes com a geometria do corpo de prova. (Hight *et al.*, 1983).

Wijewickreme e Vaid (1991) apresentaram um estudo sobre a não-uniformidade de tensões em corpos de prova do ensaio *hollow cylinder*, com uma simulação em elementos finitos, onde o comportamento não linear de areias foi representado por um modelo elástico hiperbólico. Verificou-se que a hipótese de comportamento elástico e linear superestima a não-uniformidade de tensões em corpos de prova do ensaio *hollow cylinder*. Para um solo com comportamento não linear, o coeficiente de não-uniformidade β_R não aumenta continuamente com o aumento de R como acontece com materiais com comportamento elástico linear. Segundo os autores, o domínio dos estados de tensões que podem ser avaliados através de ensaios *hollow cylinder*, é bem maior que o baseado em hipóteses de comportamento elástico linear, onde o valor de β_R não poderia ser maior que 0,2 (Vaid *et al.*, 1990). Os autores também verificaram que β_R aumenta para corpos de prova com maior massa específica; portanto o domínio disponível de estados de tensões que podem ser avaliados neste tipo de ensaio é maior para areias fofas que para as areias compactas.

2.2.2.2 Não-uniformidade de tensões devida a restrições nas extremidades

Como em todos os equipamentos de ensaio de laboratório que utilizam placas de carregamento rígidas, a não-uniformidade de tensões e deformações é gerada pelo atrito nas extremidades e pela rigidez das placas. Em muitos equipamentos é possível reduzir o atrito pela lubrificação das placas, porém esta solução não pode ser utilizada no equipamento *hollow cylinder torsional* porque o atrito entre a placa e o corpo de prova é necessário para transmissão do torque.

A restrição no deslocamento radial das extremidades do corpo de prova neste equipamento é associada ao desenvolvimento de tensões radiais cisalhantes τ_{zr} , e suas tensões complementares τ_{rz} , que decrescem à medida que se distanciam das placas. Estas tensões cisalhantes resultam em: (i) tensão circunferencial adicional; (ii) momentos de curvatura que afetam a distribuição da tensão vertical; e (iii) rotações da tensão principal fora do plano da parede do cilindro. A extensão desse distúrbio de tensão é dependente da geometria do corpo de prova, da lei constitutiva do material, das pressões aplicadas e das combinações de carregamento.

Um dos principais pré-requisitos para o desenvolvimento de um equipamento *hollow cylinder torsional* no *Imperial College*, na década de 70, foi a realização de um estudo detalhado da distribuição de tensões em corpo de provas com diferentes geometrias (Hight *et al.*, 1983). Análises de tensões e deformações pelo método dos elementos finitos foram realizadas para um grande faixa de geometrias de corpos de prova, com diferentes combinações de carregamento. Foram utilizados nas análises os modelos (i) elástico linear isotrópico e (ii) elastoplástico para representar o solo. As análises com o modelo elástico linear demonstraram que as restrições finais têm apenas efeito local na distribuição da tensão radial, σ_r , para todas combinações de carregamento e pressão utilizadas. Variações na distribuição de σ_θ e σ_z mostraram-se sensíveis à geometria (mais à altura que ao raio), para as combinações de pressão e carregamento e para os coeficientes de Poisson. Nas análises apresentadas por Hight *et al.* (1983), podem-se destacar os seguintes aspectos: (i) houve um alto nível de não-uniformidade associado com o carregamento drenado; (ii) análises com o modelo elastoplástico mostraram que a distribuição de σ_r não é significativamente afetada pelas restrições de extremidade; (iii) a distribuição de tensões é basicamente similar para materiais elásticos e elastoplásticos; (iv) a não-uniformidade de tensões torna-se maior à medida que se aproxima da ruptura; e (v) admitiu-se que é possível obter uma distribuição de tensões razoavelmente uniforme, na faixa central do corpo de prova, para a altura avaliada (250mm).

2.2.3 Seleção da geometria do corpo de prova

Como apresentado anteriormente, a não-uniformidade da distribuição de tensões através da parede do corpo de prova do ensaio *hollow cylinder*, derivada da curvatura e das restrições de extremidade, e as diferenças entre as médias reais e calculadas de tensão e deformação são dependentes da geometria.

Saada e Townsend (1981) apresentaram detalhadas considerações sobre a relação entre os diâmetros externo e interno e a altura do corpo de prova. O critério de seleção de altura proposto pelos autores é baseado na hipótese de que um tubo elástico, com espessura de parede fina, deve possuir uma zona central com o mesmo comprimento da zona influenciada pelas placas das extremidades, para que esta seja livre dos efeitos das restrições finais. Segundo os autores, as tensões cisalhantes radiais que se desenvolvem nas extremidades do corpo de prova durante o ensaio resultam em tensões circunferenciais e também momentos

nas extremidades. Os autores recorrem ao princípio de *St. Venant* para determinar o comprimento central do corpo de prova que está livre da influência destas forças. As equações para determinação destas forças seguem a teoria da elasticidade e são expressas em termos da constante β :

$$\beta = [3(1-\nu^2)/r_m^2 e^2]^{1/4} \quad (2.19)$$

onde:

ν = coeficiente de Poisson;

r_m = raio médio do corpo de prova;

e = espessura da parede do corpo de prova.

O comprimento do corpo de prova z (da extremidade em direção ao centro), para que as forças circunferenciais geradas nas extremidades sejam nulas, deve obedecer à relação $\beta.z = \pi/2$ e de maneira análoga, para que os momentos sejam nulos, vale a relação $\beta.z = \pi$. Analisando a relação entre os raios dos corpos de prova, e as tensões cisalhantes ocasionadas pela aplicação do torque, os autores concluíram que 0,65 é a razão mínima entre os raios interno e externo para garantir uma distribuição uniforme de tensões cisalhantes no corpo de prova. Com base na “teoria elástica para cascas cilíndricas de paredes finas” (Timoshenko e Goodier, 1970), Saada e Townsend (1981) sugerem as seguintes relações para a seleção da geometria de um corpo de prova tubular:

$$h \geq 5,44\sqrt{r_e^2 - r_i^2}$$

$$n = r_i / r_e \geq 0,65$$

Lade (1981) faz considerações somente sobre a altura do corpo de prova, porém enfatiza que este deve ter o comportamento de um tubo de paredes finas. Em ensaios com várias alturas de corpo de prova o autor conclui que, para um corpo de prova de 40cm, os efeitos das restrições nas extremidades são desprezíveis em ensaios realizados com uma areia fofa. Cabe

salientar que o corpo de prova possuía uma parede com 2cm de espessura e um diâmetro externo de 22cm, o que resulta em uma relação altura/ diâmetro externo de 1,82.

Rollo (2003) realizou análises de tensões e deformações através do método dos elementos finitos, a fim de estudar a influência da geometria do corpo de prova na não-uniformidade de tensões que se desenvolvem no ensaio. Entre as suas observações, as mais relevantes para este trabalho indicam que: (i) a relação altura / diâmetro externo igual a 2 apresenta menores erros que a relação igual a 1 (bastante encontrada na literatura mais antiga); e (ii) confirmando os estudos de Hight *et al.* (1983), quanto mais próximo à ruptura, maior é o grau de não-uniformidade de tensões.

Hight *et al.* (1983) enfatizam ainda que, em corpos de prova de areia, é necessário assegurar uma espessura de parede suficientemente grande em relação ao tamanho máximo do grão da amostra, de modo que os mecanismos de ruptura não sejam restringidos, e também uma densidade uniforme através da parede. Independente do tipo de solo é necessária uma espessura de parede que não seja submetida à perturbação localizada resultante da fixação da instrumentação interna utilizada para medição local de deslocamentos no corpo de prova.

2.2.4 Exemplos de moldagem de corpos de prova *hollow cylinder*

Muitos são os métodos de moldagem de corpos de prova encontrados na literatura e a maior parte das pesquisas com ensaios *hollow cylinder*, voltadas para o estudo do comportamento de solos granulares ou com alguma coesão, utilizam amostras reconstituídas em laboratório. Os métodos de moldagem variam de acordo com o tipo de solo e o tipo de ensaio que será realizado, procurando sempre reproduzir amostras próximas às condições de campo ou compatíveis com a sollicitação que é simulada no ensaio.

Hong e Lade (1989) utilizaram um consolidômetro especialmente desenvolvido para moldar corpos de prova do ensaio *hollow cylinder* em solos argilosos. O procedimento de moldagem consiste em: (i) preparar uma pasta de argila, com um teor de umidade correspondente a duas vezes o limite de liquidez da amostra, (ii) colocar esta pasta no consolidômetro e adensá-la a uma tensão vertical de aproximadamente 200kPa, e (iii) “desbastar” o corpo de prova com ferramentas apropriadas em uma mesa giratória para que atinja as dimensões finais. Após a moldagem deve ser feita a instalação das membranas de borracha interna e externa; para estes ensaios os autores utilizaram membranas com espessura variando de 0,3mm a 0,4mm. A instalação da membrana de borracha interna seguiu um

processo bastante delicado e artesanal, pois esta é moldada diretamente no corpo de prova. Para moldar a membrana interna, o corpo de prova é primeiro pulverizado com adesivo de borracha diluído para formar uma camada selante. A superfície interna é então pulverizada ou pintada com várias camadas de látex fluido. A membrana externa é do tipo convencional, pré-fabricada, sendo colocada com um esticador de membrana.

Segundo Talesnick e Frydman (1990), estudos envolvendo amostras indeformadas de argila, particularmente argila mole, não eram possíveis devido às dificuldades de moldagem do corpo de prova. Os autores desenvolveram então, um método e um equipamento para moldar corpos de prova *hollow cylinder* indeformados de argila mole. No referido trabalho, são descritos os procedimentos de moldagem e montagem do ensaio na câmara triaxial. A moldagem envolve o uso de eletro-osmose para garantir a ausência de atrito inerente às argilas moles saturadas. Durante todo o processo o corpo de prova é confinado lateralmente, axialmente, radialmente e tangencialmente.

Oda *et al.* (1978) considera a pluviação, o melhor método para simulação do processo de sedimentação de depósitos naturais ou artificiais de areia. Para a preparação de corpos de prova de areia, Sayão (1989) adotou o método de pluviação em água, seguida por vibração. Segundo o autor, esta é a técnica mais apropriada para moldagem de corpos de prova do ensaio *hollow cylinder* para solos arenosos. Para a moldagem de corpos de prova por este método, a amostra é previamente acondicionada em frascos e cuidadosamente desaerada pela percolação de água através de vácuo. As membranas de borracha interna e externa são previamente instaladas em seus respectivos moldes do corpo de prova antes da moldagem. Após a preparação da amostra os frascos e a cavidade anular formada entre os moldes interno e externo são preenchidos com água desaerada. Os frascos são invertidos e sua cavidade é submersa na água que se encontra confinada no molde; então o processo de sedimentação se inicia sob o efeito da gravidade. A sedimentação continua até que se deposite um excesso de areia no topo do molde. Após a pluviação inicia-se o procedimento de vibração para alcançar a densidade desejada; durante esta etapa as variações na altura do corpo de prova são monitoradas e a amostra é drenada. A superfície superior do corpo de prova é cuidadosamente nivelada através de um sifão que retira o excesso de areia aplicando uma pequena sucção. Os moldes são posteriormente retirados após a aplicação de uma sucção no interior do corpo de prova que é então confinado entre as membranas. Hight *et al.* (1983) também utilizaram o método de pluviação em água para moldar corpos de prova de areia; os moldes interno e

externo utilizados por estes autores são montados através de segmentos que se conectam, facilitando a sua retirada após a moldagem. O’Kelly e Naughton (2005) realizaram ensaios *hollow cylinder* em uma areia e apresentam em detalhes o método de moldagem por pluviação em água, além de resultados que comprovam sua boa repetibilidade. No solo utilizado por estes autores, este método produz corpos de prova com uma anisotropia inerente, orientada com o plano horizontal. Foi verificado que esta anisotropia inicial diminui com o decréscimo do índice de vazios, o que sugere que é possível produzir um nível específico de anisotropia inerente nos corpos de prova, por meio do controle do índice de vazios inicial durante a moldagem (O’Kelly e Naughton, 2005).

Kuerbis e Vaid (1988) fizeram uma revisão das técnicas de moldagem mais utilizadas para materiais granulares: compactação por impacto do solo úmido (*moist tamping*), pluviação no ar, pluviação em água e o método de deposição na forma de lama (“*slurry*”). Os autores acreditam que o método de compactação por impacto do solo úmido reproduz a estrutura do solo em aterros compactados, o método de pluviação no ar reproduz o ambiente de deposição ocasionado pelo vento em depósitos eólicos e o método de pluviação em água simula a deposição lenta de sedimentos em ambientes marinhos. O método de deposição na forma de lama é mais apropriado para a simulação de ambientes aquáticos onde a deposição é mais rápida como em rios e estuários; este método possui a vantagem, em comparação com o método de pluviação em água, de não ocasionar a segregação de partículas em materiais granulares bem graduados.

Zdravkovic (1996) modificou o método de deposição na forma de lama descrito por Kuerbis e Vaid (1988) com o objetivo de adaptá-lo para a preparação de corpos de prova para o ensaio *hollow cylinder*. A descrição detalhada deste método modificado pode ser encontrada em Rollo (2003), que o utilizou em seu estudo. Basicamente o método consiste em misturar o solo seco com água desaerada em um misturador sob a aplicação de vácuo para eliminar o ar da mistura. A pasta desaerada que se origina deste processo é então cuidadosamente depositada em um molde, através de um funil, estando ambos completamente preenchidos com água, assegurando-se que o solo fique submerso durante todo processo. Segundo Rollo (2003), esta técnica assegurou uma excelente uniformidade nos corpos de prova e uma ótima repetibilidade de ensaios.

O manual de procedimentos de ensaios *hollow cylinder* do fabricante de equipamentos de laboratório *Wykeham Farrance Int.* possui uma descrição sucinta de um procedimento de moldagem para solos granulares, do tipo pluviação em água. Este procedimento consiste em:

(i) retirar o ar do solo (no caso de amostras úmidas) através de prévia ebulição em água; (ii) colocar o material saturado manualmente no interior do molde completamente preenchido com água utilizando uma colher (sem permitir o contato com o ar) e (iii) realizar uma compactação manual para alcançar a densidade desejada.

Brown e Richardson (2004) apresentam o método utilizado para moldar corpos de prova para o ensaio *hollow cylinder*, no seu estudo sobre o comportamento de materiais granulares em camadas de pavimento. As membranas externa e interna são fixadas nos seus respectivos moldes, que são fixados em uma mesa vibratória. A massa de material correspondente ao índice de vazios desejado é acondicionada entre os moldes, através de pluviação, e um anel pesando 6kg é posicionado sobre a amostra ainda não compactada. O conjunto é então submetido à vibração por um período pré-determinado. Após este processo de compactação é aplicado vácuo no corpo de prova para que se possa proceder à remoção dos moldes.

Chaudhary *et al.* (2002) realizaram ensaios *hollow cylinder* em uma areia, com diferentes métodos de moldagem: pluviação no ar, pluviação em água e o método de compactação por penetração de vareta (Figura 2.9). Este método, em inglês denominado de “*dry rodding method*”, tem como objetivo produzir corpos de prova relativamente homogêneos, destruindo qualquer orientação preferencial entre as partículas, proveniente do processo de pluviação por ar. Consiste na pluviação da areia em camadas e, cada camada sofre um número pré-fixado de penetrações de uma vareta, em pontos aleatoriamente distribuídos. Os autores utilizaram uma vareta de madeira, com 4mm de diâmetro, que foi penetrada 20 vezes, até o fim de cada camada. Corpos de prova com 20 mm de espessura de parede foram moldados por este método.

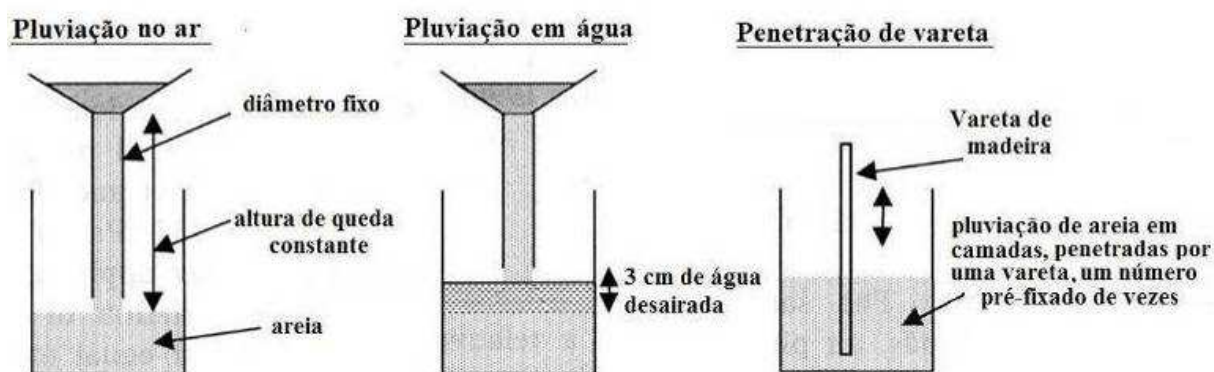


Figura 2.9 – Métodos de moldagem de corpos de prova para o ensaio *hollow cylinder* utilizados por Chaudhary *et al.* (2002).

2.2.5 Aplicações do equipamento *hollow cylinder torsional*

Corpos de prova tubulares de solo foram utilizados pela primeira vez por Cooling e Smith (1936), que aplicaram torque em amostras não confinadas. Desde então, corpos de prova tubulares têm sido utilizados no ensaio *hollow cylinder* para a investigação de vários aspectos do comportamento mecânico de solos. Em função de sua versatilidade, o equipamento *hollow cylinder torsional* tornou-se uma ferramenta de pesquisa fortemente utilizada em todo mundo nas últimas três décadas. Na bibliografia consultada, a maior parte dos equipamentos foi desenvolvida dentro de suas respectivas instituições de pesquisa. O item 2.2.6 apresenta um mapeamento de todos os equipamentos encontrados na literatura, com desenhos esquemáticos e uma breve descrição. Comercialmente, equipamentos *hollow cylinder torsional* são desenvolvidos por empresas internacionais como a *GDS Instruments* (www.gdsinstruments.com), a *GCTS* (www.gcts.com) e também a *Wykeham Farrance Int.* (www.wfi.co.uk). Não foram encontradas bibliografias nacionais sobre este assunto até o momento, o que leva a crer que ainda não existem equipamentos *hollow cylinder torsional* em funcionamento no país.

Este item ilustra a utilização de equipamentos *hollow cylinder torsional*, através da apresentação resumida de alguns trabalhos com diferentes objetivos. Por se tratar de um ensaio bastante completo na simulação de condições de campo, sua utilização abrange uma larga gama de aplicações. Segundo o levantamento bibliográfico feito para esta pesquisa, ensaios *hollow cylinder torsional* vêm sendo utilizados principalmente nos estudo de anisotropia dos solos e no fenômeno de liquefação de areias. Apesar de existirem várias

pesquisas sobre comportamento de materiais argilosos, a grande maioria dos trabalhos encontrados estuda o comportamento de solos arenosos. Foram encontradas poucas publicações que correlacionam ensaios *hollow cylinder* torsionais com o comportamento de camadas de pavimento; estes trabalhos serão apresentados com mais detalhes no item 2.3.2.

2.2.5.1 Estudo da anisotropia de tensões e deformações

Em geral, os solos possuem anisotropia inerente, porém sua resposta ao carregamento depende, em parte, da orientação das tensões principais durante o cisalhamento. Uma vez que anisotropia pode ser induzida pelas variações na direção das tensões aplicadas, pode-se considerar que uma anisotropia adicional é acrescentada à anisotropia inerente do material. Symes *et al.* (1984) estudaram a influência da anisotropia de solos arenosos em um equipamento *hollow cylinder torsional*. Para analisar o comportamento não drenado de uma areia medianamente compacta, foram realizados três tipos de ensaios com valor de b constante: (i) três ensaios com α constante para verificar a influência da anisotropia inicial; (ii) dois ensaios onde se avaliou a influência da variação de α na mesma amostra; e (iii) um ensaio com rotação cíclica da direção da tensão principal maior. A Figura 2.10 apresenta gráficos de q versus α , mostrando as diferentes trajetórias de carregamentos seguidas durante os ensaios. O primeiro tipo de ensaio avaliou a influência da anisotropia inicial, que foi bastante pronunciada. Os autores observaram que a envoltória de ruptura varia de acordo com a direção do carregamento; o valor de $q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$, alcançado na ruptura para α igual a 45° , foi em torno de 52% do valor de q na ruptura para o ensaio com α igual a 0° . No segundo tipo de ensaio foi verificado que a rotação de tensões durante o ensaio não influencia nos valores de ruptura. O ensaio onde a tensão principal vertical foi rotacionada de 0° a 45° apresentou o mesmo valor para a relação q/p' na ruptura que o ensaio realizado com α constante e igual a 45° ; o mesmo se observou para o ensaio onde α foi rotacionado de 45° para 0° . No terceiro tipo de ensaio, a rotação cíclica da direção das tensões principais para um valor de q constante (em um intervalo de 0° a $24,5^\circ$), não apresentou graus significativos de anisotropia, para qualquer direção de carregamento. Após o carregamento cíclico α foi rotacionado para 45° e a relação q/p' não foi afetada; permaneceu a mesma encontrada nos outros tipos de ensaio que romperam com o mesmo valor de α . Os autores concluíram que a anisotropia inerente inicial deste solo é o fator que controla o seu comportamento quanto à resistência ao cisalhamento,

sobrepondo-se aos efeitos da anisotropia induzida pelas variações na direção das tensões principais.

Miura *et al.* (1986a) estudaram as deformações de uma areia densa, com anisotropia inerente, submetida à rotação das tensões principais. Os corpos de prova para os ensaios *hollow cylinder* possuíam uma estrutura anisotrópica formada pelo alinhamento paralelo de suas partículas, induzido pelo processo de moldagem. Os autores concluíram que a deformação de areias anisotrópicas pode ser estimada pelo deslocamento das partículas nos seus planos preferenciais de deposição (Figura 2.11). Com base nesta teoria, Miura *et al.* (1986b) propuseram um modelo para previsão da deformação de areias durante a rotação do eixo das tensões principais. O modelo foi verificado pela comparação com resultados de ensaios *hollow cylinder* e apresentou um bom ajuste.

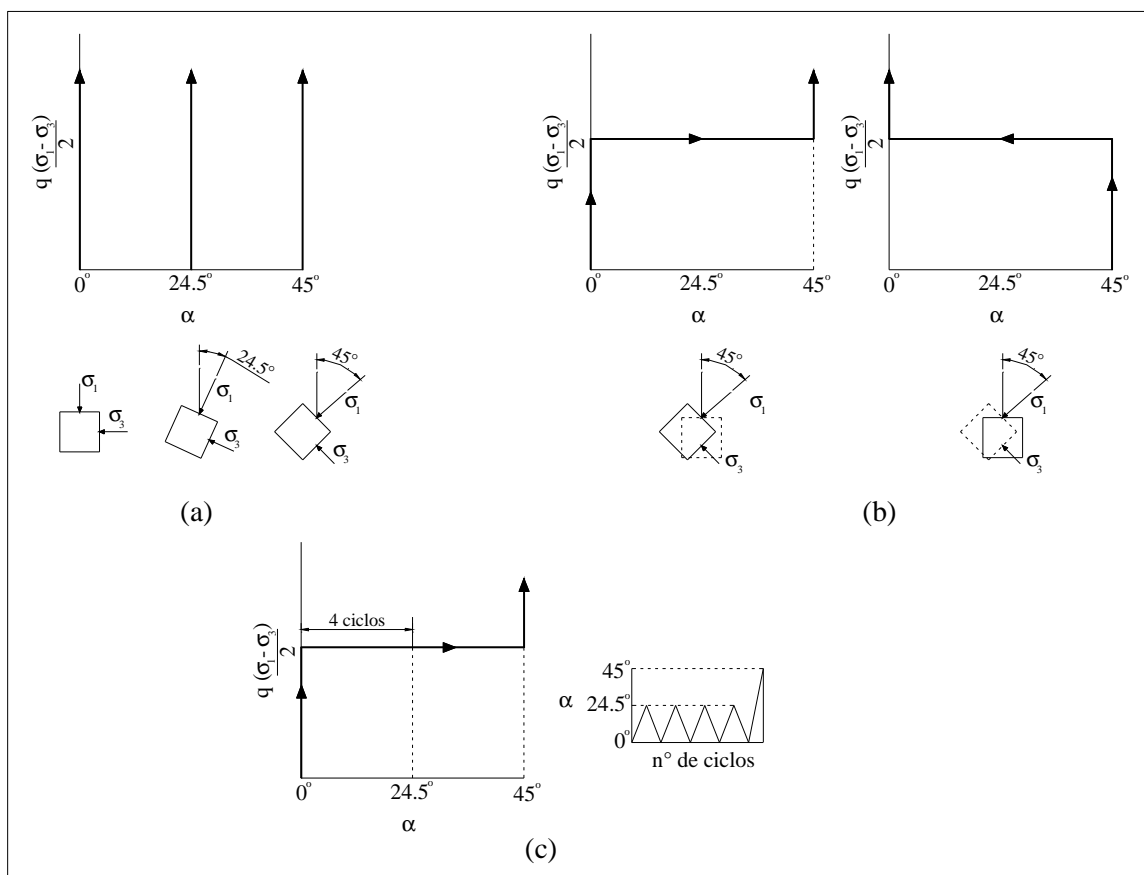


Figura 2.10 – Trajetórias de carregamentos utilizados nos ensaios *hollow cylinder* de Symes *et al.* (1984): (a) ensaios com α constante, (b) rotação de α durante o ensaio e (c) rotação cíclica de α .

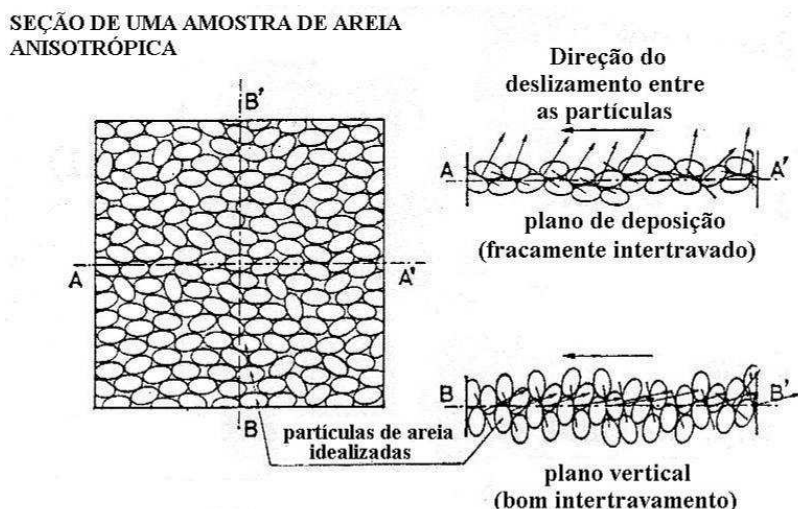


Figura 2.11 – Representação esquemática do plano preferencial de deposição das partículas, em uma amostra de areia com anisotropia inerente (Miura *et al.*, 1986b).

Uma série de ensaios *hollow cylinder* foi realizada por Zdravkovic e Jardine (2000) com o objetivo de estudar a anisotropia de resistência não drenada de um solo siltoso, adensado na condição K_0 . Os ensaios foram realizados com $b = 0,5$ com o objetivo de simular uma condição próxima ao estado de deformação plana. O valor de α variou de 0° a 90° . O ensaio com $\alpha = 0^\circ$ foi repetido para um valor de $b = 0,3$. A magnitude da tensão desvio na ruptura para o ensaio com $b = 0,3$ foi muito próxima à do ensaio com $b = 0,5$, mas o valor de ϕ' mobilizado foi 9° menor. A Figura 2.12 apresenta um gráfico de ϕ' versus α , com uma envoltória relacionando estes valores para $b = 0,5$ e outra envoltória, estimada, para $b = 0,3$, que sugere que o valor de b têm influência apenas para baixos valores de α . O gráfico desta figura também apresenta os pontos referentes a ensaios triaxiais realizados neste mesmo solo, nas condições $b = 0$ (compressão triaxial) e $b = 1$ (extensão triaxial), para corpos de prova moldados com $OCR = 1$. A resistência não drenada deste solo (s_u) reduz em torno de 65% quando α é rotacionado de 0° para ângulos superiores a 45° . Segundo Zdravkovic e Jardine (2000), o valor de b tem uma forte influência em ensaios com baixos valores de α , que pode ser relacionada a diferentes graus de liberdade da deformação radial. Quando $b > 0$, σ_r é maior que σ_θ , e ocorre certa restrição na liberdade das partículas de acomodar os deslocamentos verticais causados pelo movimento lateral. Conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento da amostra aumenta. Também é citado que o método utilizado para moldagem (deposição na

forma de lama) e a condição K_o imposta aos corpos de prova, os tornam mais resistentes na direção vertical.

Chaudhary *et al.* (2002) apresentaram um estudo sobre o efeito da estrutura inicial de uma areia medianamente densa, no seu comportamento tensão-deformação, através de ensaios *hollow cylinder* drenados com rotação cíclica das tensões perincipais. Foram utilizados três diferentes métodos de moldagem: pluviação por ar, por água e o método de compactação por penetração de vareta. Foram realizados ensaios com α variando ciclicamente de 0° a 90° , $22,5^\circ$ a $-67,5^\circ$ e 45° a -45° . Anisotropias de resistência ao cisalhamento e deformabilidade foram observadas em função da direção do cisalhamento. A principal influência do método de moldagem foi na deformação volumétrica. Em geral, os ensaios com $-67,5^\circ \leq \alpha \leq 22,5^\circ$, apresentaram as maiores deformações volumétricas. A deformação cisalhante residual desenvolvida em corpos de prova moldados com pluviação por ar foi maior que nos corpos de prova moldados pelos outros métodos. Independente do método de moldagem, os ensaios com $-45^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ apresentaram menor deformação cisalhante residual. O método de moldagem por penetração de vareta foi o que apresentou menos anisotropia entre os diferentes tipos de ensaio.

Rollo (2003) utilizou um equipamento *hollow cylinder torsional* para investigar o comportamento tensão-deformação e a anisotropia de resistência ao cisalhamento de um material composto por uma mistura de areia com 15% de argila, para diferentes valores de α e b . Os efeitos da geometria dos corpos de prova e das condições de contorno foram também estudados em detalhe através de análises de tensões e deformações pelo método dos elementos finitos. O autor constatou que os valores de ângulo de atrito interno são mais sensíveis à variação dos valores de b do que à variação de α . Os valores de resistência ao cisalhamento não drenada tendem a diminuir com o aumento dos valores de α e b . O autor observou que as direções dos incrementos de tensão e deformação não estavam completamente alinhados durante o cisalhamento. Entretanto, o valor de α (inclinação da tensão principal maior) foi muito próximo ao valor de $\alpha_{\Delta\epsilon}$ (inclinação do incremento de deformação principal maior) para grandes deformações, o que sugere que a teoria da plasticidade é mais aplicável próximo à ruptura. Para pequenas deformações $\alpha_{\Delta\sigma}$ (inclinação do incremento da tensão principal maior) foi em torno de 15° maior que $\alpha_{\Delta\epsilon}$, indicando um comportamento não elástico.

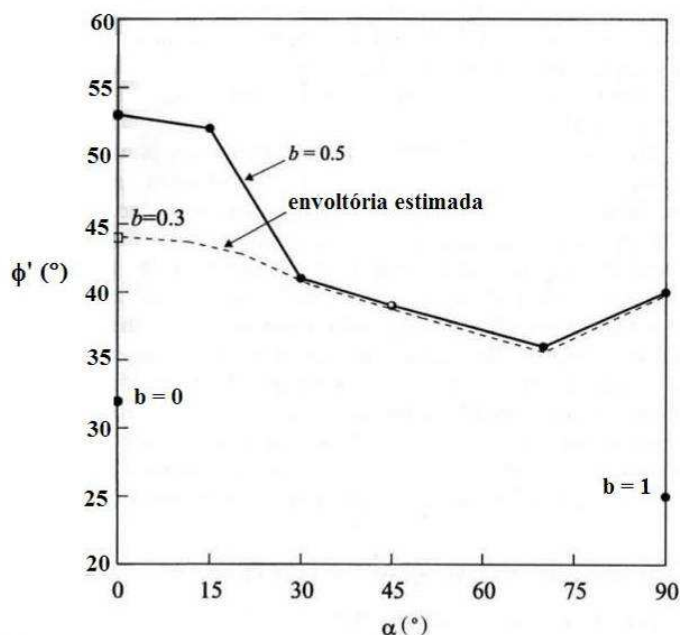


Figura 2.12 – Variação de ϕ' com α , em ensaios *hollow cylinder* com $b = 0,5$ e $b = 0,3$, e valores de ϕ' para $b = 0$ e $b = 1$ (compressão e extensão triaxial, respectivamente), conforme Zdravkovic e Jardine (2000).

2.2.5.2 Liquefação

O fenômeno da mudança súbita de comportamento das areias do estado sólido para o líquido, conhecido como liquefação, é estudado desde o início da mecânica dos solos. Este fenômeno está frequentemente associado à ocorrência de deslizamentos de talude e terremotos (Ishihara, 1993). Existem diversas situações em que a rotação cíclica da direção das tensões principais em uma areia conduz ao fenômeno de liquefação e entre estas, uma das mais severas se deve ao efeito do movimento das ondas em depósitos marítimos durante tempestades (Towhata e Ishirara, 1985). A Figura 2.13, apresentada por Ishirara e Towhata (1983), mostra o carregamento ocasionado pelo movimento das ondas em um depósito marítimo de areia. No instante em que a crista da onda se posiciona sobre o centro de um elemento de solo, uma pressão vertical positiva se desenvolve, mas quando a crista se inverte sobre este mesmo ponto do solo, a pressão resultante vertical é negativa. Conseqüentemente ocorre uma inversão cíclica do sentido da pressão vertical durante a propagação das ondas (Figura 2.12a). No instante intermediário entre estes dois extremos, este mesmo elemento de solo é submetido a tensões cisalhantes (Figura 2.12b). Estas tensões cisalhantes também mudam de direção conforme o curso da propagação das ondas, induzindo também a uma

variação cíclica da tensão cisalhante. Como pode ser observado, a variação cíclica da tensão vertical está 90° fora de fase com a variação cíclica da tensão cisalhante. Resultados da investigação deste comportamento são apresentados por Ishirara e Towhata (1983), através de ensaios em um equipamento *hollow cylinder torsional*. Os autores verificaram que as deformações características da areia são mais ou menos elásticas no começo do carregamento cíclico, mas como a poro-pressão se desenvolveu perto do início da liquefação, as deformações apresentaram um comportamento predominantemente plástico.

Towhata e Ishirara (1985) avaliaram a resistência à liquefação de uma areia em um equipamento *hollow cylinder torsional*. Os autores dividiram a sua investigação em duas fases. Primeiro o ensaio cíclico era realizado na condição não drenada. Após a ocorrência da liquefação o ensaio era drenado, o corpo de prova cuidadosamente re-adensado e então, o ensaio recomeçava. O objetivo deste procedimento foi simular o efeito da história de tensões na liquefação de um solo que já passou por um terremoto. Os autores observaram que a resistência à liquefação reduziu em torno de 8%.

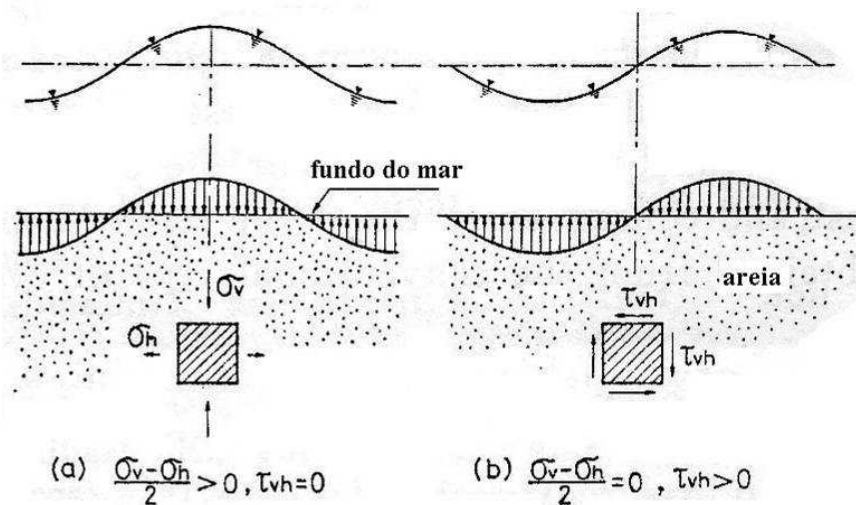


Figura 2.13 – Tensões ocasionadas pelo movimento das ondas em um depósito marítimo de areia: (a) crista da onda sobre um elemento de solo, (b) tensões cisalhantes defasadas de 90° das tensões normais (Ishirara e Towhata, 1983).

2.2.5.3 Solos argilosos

Em um estudo apresentado por Hong e Lade (1989), várias trajetórias de tensões foram propostas em ensaios *hollow cylinder torsional*, para investigar a relação entre a direção da

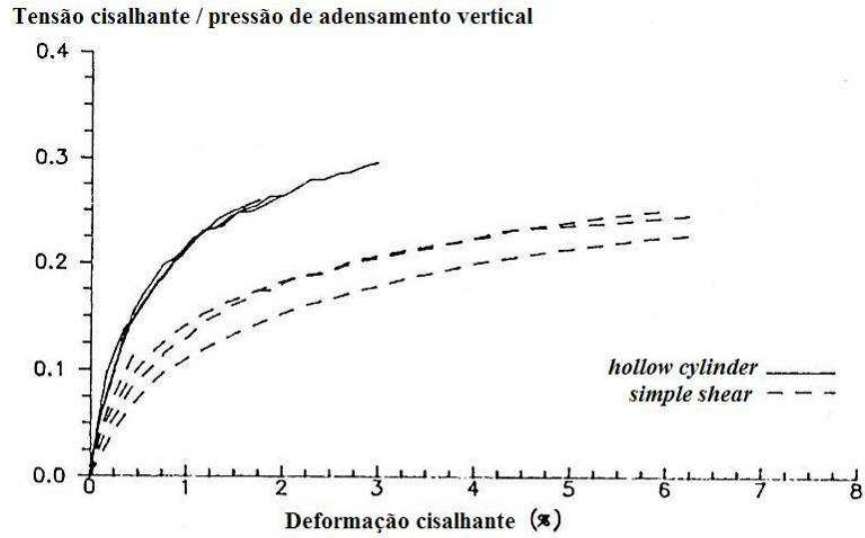
tensão principal maior, o incremento de tensão, e o incremento de deformação durante a rotação do plano de tensões principais. Ensaios drenados e não drenados foram realizados em uma argila. Os resultados experimentais indicaram que a direção do incremento de deformação principal maior coincidia com a direção da tensão principal maior na ruptura, sugerindo que a teoria da plasticidade podia ser aplicada. Foi verificado também, que a direção do incremento de deformação principal maior coincidia com a direção do incremento de tensão principal maior, para pequenos níveis de tensão, o que sugere um comportamento elástico. Os autores observaram uma transição gradual do comportamento elástico para o plástico, à medida que os níveis de tensão aumentavam, o que sugere a validade da aplicação da teoria elásto-plástica, para modelar o comportamento desta argila durante a rotação da direção das tensões principais.

Talesnick e Frydman (1991) realizaram ensaios *hollow cylinder* em uma argila mole. Também foram realizados ensaios em um equipamento *simple shear* e a comparação das curvas tensão-deformação apresentou valores inferiores de resistência ao cisalhamento e rigidez no ensaio *simple shear* (Figura 2.14a). Os autores citam que esta diferença é freqüentemente encontrada na literatura. Também foi citado que o ensaio *simple shear* apresentou vários problemas que conduziram a erros na interpretação dos resultados, enquanto o ensaio *hollow cylinder* apresentou resultados mais homogêneos e confiáveis. Em geral, a inclinação de α durante o cisalhamento cíclico chegou a $\pm 40^\circ$ nos pontos extremos (Figura 2.14b). Segundo os autores, para grandes deformações, freqüentemente admite-se que os solos se comportam como materiais plásticos, e as direções dos incrementos de deformação principal e a tensão principal são colineares. Nestes ensaios a direção do incremento de deformação principal maior ($\alpha_{\Delta e}$) se manteve constante, em torno de $\pm 45^\circ$, o que indica um afastamento do comportamento perfeitamente plástico. Os autores atribuem esta ocorrência a uma possível anisotropia inerente a estrutura do solo.

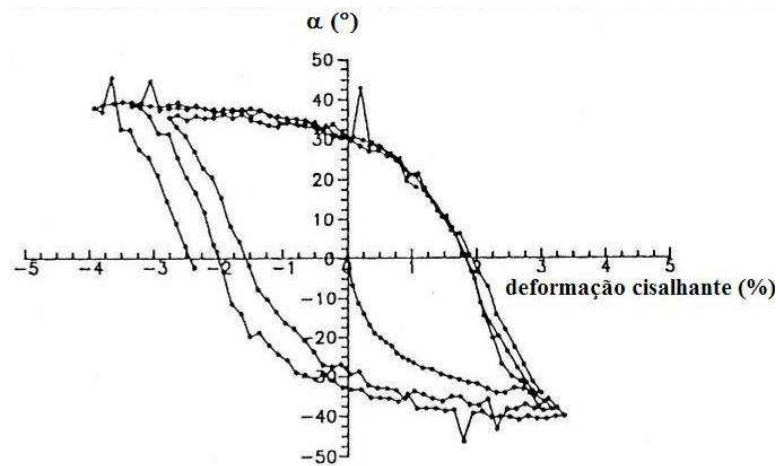
Nasreddine (2004) realizou uma modelagem numérica de ensaios *hollow cylinder* torsionais. Para comparação, o autor utilizou resultados de ensaios realizados em uma argila, que permitiram calibrar o modelo e também validá-lo. O modelo reológico utilizado foi o elástico linear isotrópico para validar a geometria do corpo de prova e as condições de carregamento. A plasticidade foi introduzida utilizando os critérios de *Mohr-Coulomb* e *Cam-Clay* modificado. Três tipos de ensaio no equipamento *hollow cylinder* foram modelados: compressão pura, extensão pura e torção (com $b \approx 0,5$, condição de deformação plana); a

Figura 2.15 mostra a projeção dos corpos de prova modelados e os reais, submetidos a estes ensaios. A modelagem numérica apresentou um comportamento coerente com o observado nos ensaios. Algumas modificações no modelo numérico foram feitas para adequar os critérios utilizados (*Cam-Cay* modificado e *Mohr-Coulomb*) ao efeito da rotação das tensões principais e à variação da tensão principal intermediária, no caso dos ensaios torsionais.

Minh (2006) realizou ensaios *hollow cylinder* para estudar o comportamento tensão-deformação de uma argila. O material estudado apresentou um comportamento fortemente anisotrópico, principalmente em ensaios com $b = 0,5$ e $0,3$. Em geral, na compressão triaxial ($\alpha < \pm 45^\circ$), foram encontrados valores altos de resistência ao cisalhamento, sendo que a máxima resistência correspondeu ao valor $\alpha = 0^\circ$. Em contraste, baixos valores de resistência foram encontrados na extensão triaxial ($\alpha = \pm 90^\circ$) e no cisalhamento torsional ($\alpha = \pm 45^\circ$). O autor compara os altos valores encontrados para relação q/p' na compressão, com a envoltória de ruptura definida por outros autores (Nishimura *et al.* 2007 *apud* Minh, 2006) que estudaram a mesma argila e correlacionaram seu comportamento com fatores como: o nível de tensão efetiva, a razão de pré-adensamento *OCR* e a litologia do solo. A anisotropia de resistência ao cisalhamento apresentou valores de q/p' que variam numa faixa de 40%, para $b = 0,5$. O valor de σ_2 , representado pelo parâmetro b , teve forte influência na resistência ao cisalhamento desta argila, para a mesma direção (mesmo α) a resistência ao cisalhamento na condição de deformação plana foi maior que nas outras condições simuladas. Os critérios de ruptura de *Matsuoka-Nakai* e *Lade-Duncan*, que consideram a influência de σ_2 , se ajustaram bem à condição de deformação plana, mas não apresentaram um bom ajuste quando $b = 0$ e $b = 1$. Minh (2006) cita que para estes casos, o critério de *Mohr-Coulomb* pode ser utilizado como uma alternativa conservadora, apesar de também não apresentar um bom ajuste.



(a)



(b)

Fig 2.14 – (a) comparação entre ensaios *hollow cylinder* e *simple shear* e (b) variação cíclica de α com a deformação cisalhante em ensaio *hollow cylinder* (Talesnick e Frydman, 1991).

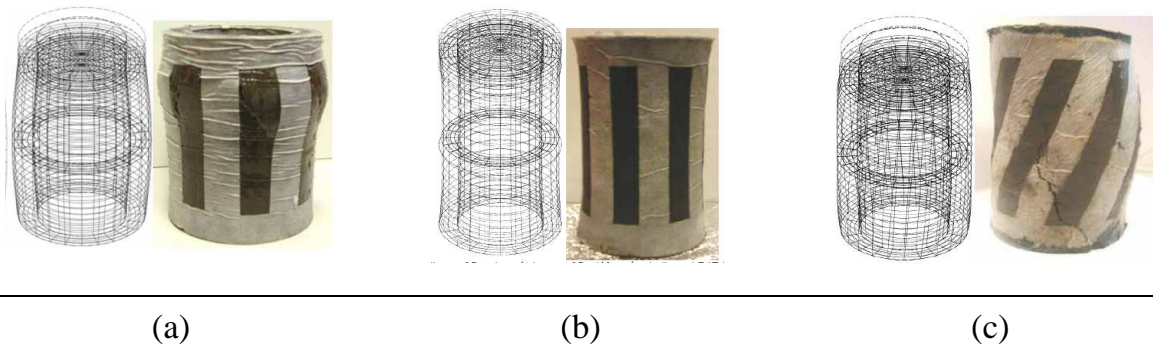


Figura 2.15 – Corpos de prova com formatos definidos pelo modelo numérico e corpos de prova após o ensaio *hollow cylinder*: (a) ensaio de compressão, (b) ensaio de extensão e (c) ensaio torsional (Nasreddine, 2004).

2.2.6 Equipamentos *hollow cylinder torsional* no mundo

No laboratório de Geotecnia do *Imperial College da London University* (Inglaterra) existem hoje três equipamentos *hollow cylinder torsional* em funcionamento (Jardine *et al.*, 2004):

(i) Equipamento *hollow cylinder torsional* para corpos de prova grandes, desenvolvido e descrito por Hight *et al.* (1983) no início da década de 80. A Figura 2.16a apresenta um desenho esquemático apresentado pelos autores. O equipamento utiliza corpos de prova com 254 mm de altura, e diâmetros externo e interno de 254 mm e 203 mm, respectivamente. Todo o sistema de aplicação de carga é instalado em um pórtico sobre o corpo de prova. O sistema de aplicação de torque é composto por dois cilindros pneumáticos *Bellofram* atuando em sentidos opostos que, através da aplicação de forças horizontais, promovem o giro de em um eixo central sobre o corpo de prova (Figura 2.17). Nas duas últimas décadas este equipamento foi utilizado por diversos autores (Shibuya, 1988, Menkiti, 1995, Rollo, 2003), que gradualmente introduziram modificações, principalmente na instrumentação e automatização dos ensaios, porém suas características básicas como a estrutura, o sistema de aplicação de cargas e o tamanho do corpo de prova foram mantidas².

(ii) A Figura 2.16b mostra o equipamento utilizado por Nishimura (2005). Este equipamento foi desenvolvido a partir de um equipamento de coluna ressonante fabricado pela empresa *Soil Dynamics Instrument Ltd.* O equipamento entrou em

² Com base na referência mais atual encontrada, o trabalho de Rollo (2003).

operação no início da década de 90, após modificações realizadas pelo fabricante e pelo *Imperial College*. Foi adaptado para realizar ensaios *hollow cylinder torsional* e coluna ressonante. As dimensões do corpo de prova podem ser modificadas de acordo com o tipo de ensaio. A altura pode variar de 165 mm a 195 mm, e os diâmetros externo e interno podem ser de 71 mm e 38 mm ou 100 mm e 71 mm. O sistema de aplicação de carga estática e o sistema para realização do ensaio de coluna ressonante possuem controles independentes, possibilitando a realização de ensaios estático e dinâmico simultaneamente. Este equipamento é capaz de investigar o comportamento tensão-deformação do solo para uma larga faixa de deformações, através da aplicação de torção no corpo de prova e também pela combinação dos dois tipos de ensaio. Na pesquisa de Nishumura (2005) foram feitas algumas modificações como: novos sistemas de instrumentação interna e aquisição automática de dados, e instalação de palhetas nas pedras porosas de topo e base do corpo de prova.

(iii) O equipamento *hollow cylinder torsional* desenvolvido por Jardine na década de 90 é o mais recente do *Imperial College* (Jardine, 1997 *apud* Jardine et al., 2004). O desenho esquemático com a identificação dos seus principais componentes é apresentado na Figura 2.16c. Segundo Minh (2006), este equipamento foi desenvolvido com base nos dois equipamentos anteriores e na experiência acumulada no grupo de pesquisa da universidade. O equipamento comporta dois tamanhos de corpo de prova, com altura, diâmetro externo e diâmetro interno de 200 x 100 x 60 mm e 300 x 200 x 160 mm, respectivamente. Toda a aplicação de cargas se localiza na base do corpo de prova. O equipamento é capaz de medir grandes deformações e aplicar qualquer valor de b e α . O sistema de torque é análogo ao desenvolvido por Hight *et al.* (1983). Minh (2006) utilizou este equipamento na sua tese de doutorado e desenvolveu um novo sistema de instrumentação interna para medição local de deformações (Figura 2.18).

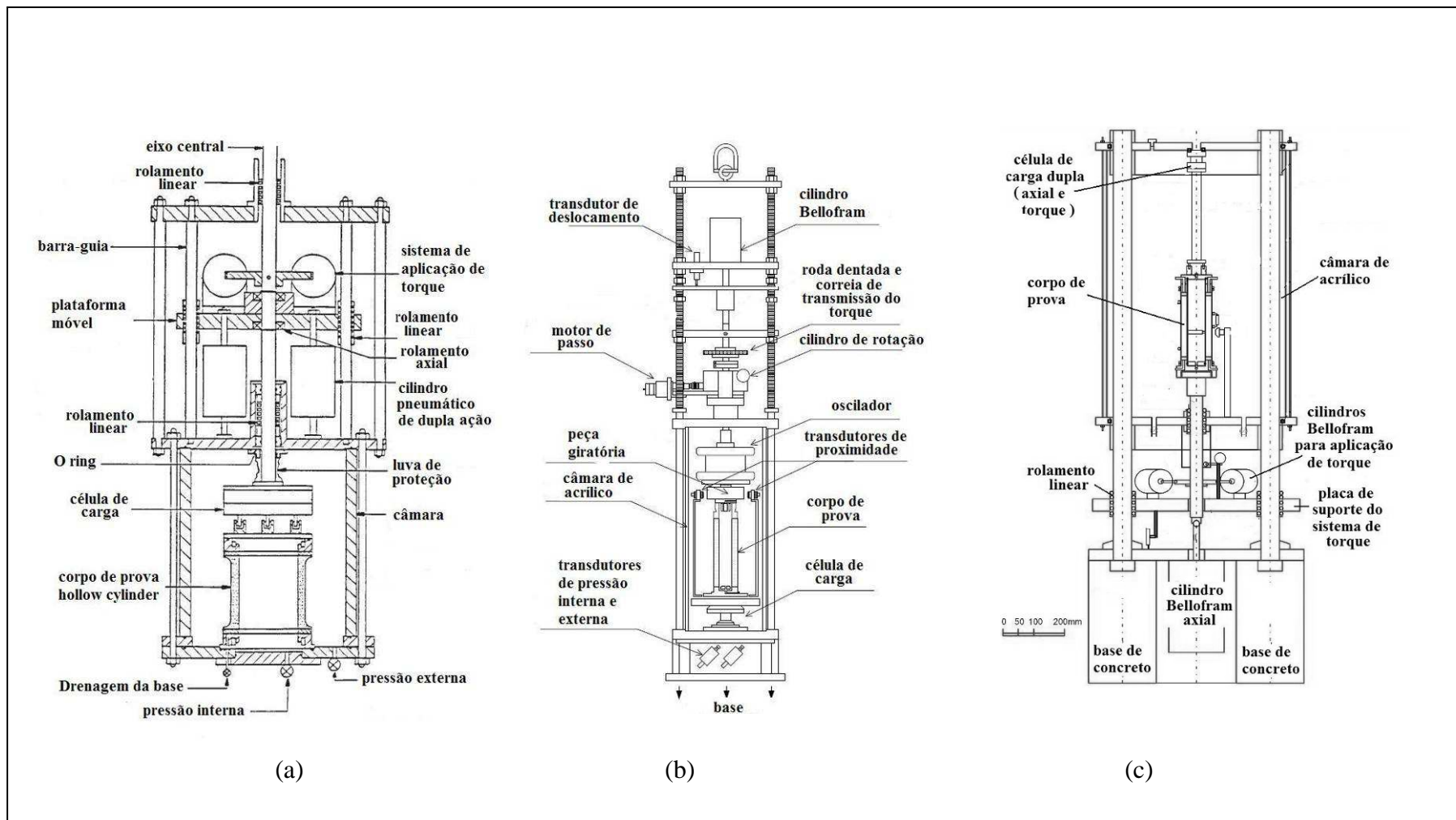


Figura 2.16 –Equipamentos hollow cylinder torsional do Imperial College: (a) Hight et al. (1983), (b) Nishimura (2005) e (c) Minh (2006).

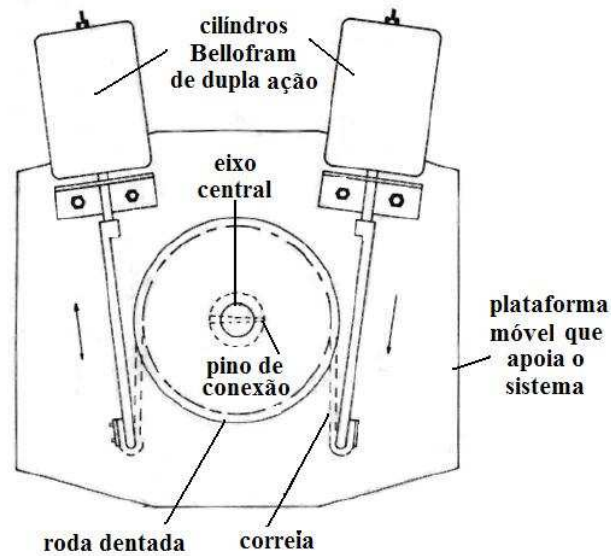


Figura 2.17 – Detalhe do sistema de aplicação de torque (vista superior), conforme Hight *et al.* (1983).

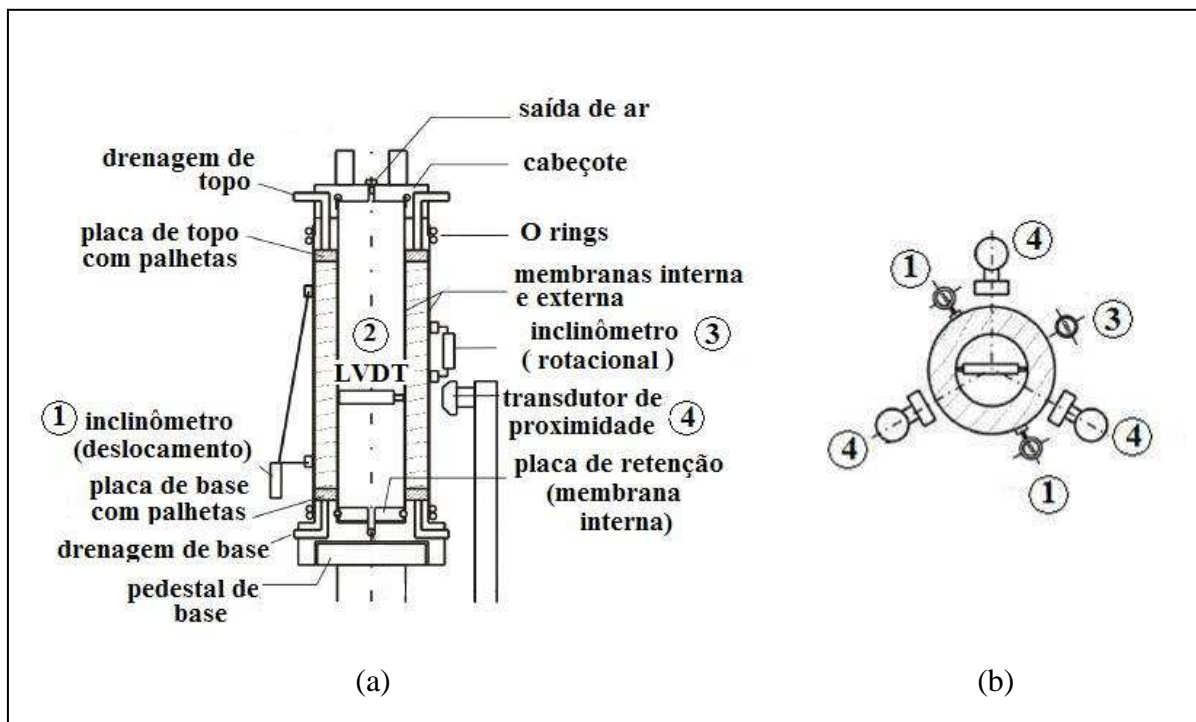


Figura 2.18 - Instrumentação local do corpo de prova utilizada por Minh (2006): (a) vista frontal do corpo de prova instalado na câmara de ensaio e (b) vista superior do corpo de prova.

Na *University of Nottingham*, também na Inglaterra, existe um equipamento *hollow cylinder torsional* no *Pavement and Geotechnics Research Group*. Este equipamento foi desenvolvido e parcialmente construído por O'Reilly (1985). As dimensões adotadas para o corpo de prova foram: 500 mm de altura, 280 mm de diâmetro externo e 224 mm de diâmetro interno. Na versão inicial, os carregamentos verticais e torsionais eram aplicados por macacos hidráulicos. Thom (1988) realizou algumas modificações e desenvolveu um sistema que aplicava as cargas axiais e torsionais através do mesmo eixo. Ainda havia algumas limitações no sistema de aplicação de pressão interna à câmara, que foram solucionadas por Chan (1990). Este autor também introduziu outras importantes modificações como: (i) novo *layout* do cabeçote e pedestal do corpo de prova (Figura 2.19); (ii) atualização do controle eletrônico dos sistemas de carregamento e (iii) novo sistema de aquisição de dados. A descrição mais atual encontrada na literatura (Brown e Richardson, 2004) apresenta o equipamento com as modificações realizadas por Richardson (1999). Uma de suas prioridades foi separar o sistema de aplicação de carga axial e torsional, para diminuir os erros verificados na medição de tensões e deformações. Além disso, o autor também implantou melhorias na instrumentação e nos sistemas automatizados de aplicação de cargas e aquisição de resultados. A Figura 2.20a apresenta o *layout* do equipamento inicialmente desenvolvido por O'Reilly (1985) e na Figura 2.20b é apresentada uma versão mais atual, após as modificações realizadas por Richardson (1999). Em março de 2006 foi inaugurado nesta universidade o *Nottingham Geotechnical Centrifuge and Research Laboratory*³, que conta com novos equipamentos triaxiais, *simple shear* e *hollow cylinder torsional*, além de equipamentos pra ensaios em rocha e ensaios em grande escala.

Na *University of Southampton* (Inglaterra) existe um equipamento *hollow cylinder torsional* no *Geotechnical Research Group*, porém não foram encontradas referências bibliográficas disponíveis. Segundo a *homepage* da universidade, este equipamento foi utilizado na tese de Gräbe (2002)⁴, sobre deformações permanentes e resilientes de camadas de fundação de lastros de ferrovias. Este núcleo da universidade faz parte também de um grupo de pesquisas filiado ao *Rail Research UK*⁵ e, em parceria com a *University of Birmingham* (Inglaterra), desenvolve pesquisas aplicadas ao comportamento de materiais granulares de base e sub-base ferroviárias. O uso do equipamento *hollow cylinder torsional* é citado como uma de suas principais ferramentas de investigação.

³ <http://www.nottingham.ac.uk/ngc/index2.html?news/news.html> (disponível em 01/05/07)

⁴ <http://www.soton.ac.uk/~geotech/phds/grabe.htm> (disponível em 01/05/07)

⁵ <http://portal.railresearch.org.uk/RRUK/Site%20Pages/Projecta1.aspx> (disponível em 01/05/07)

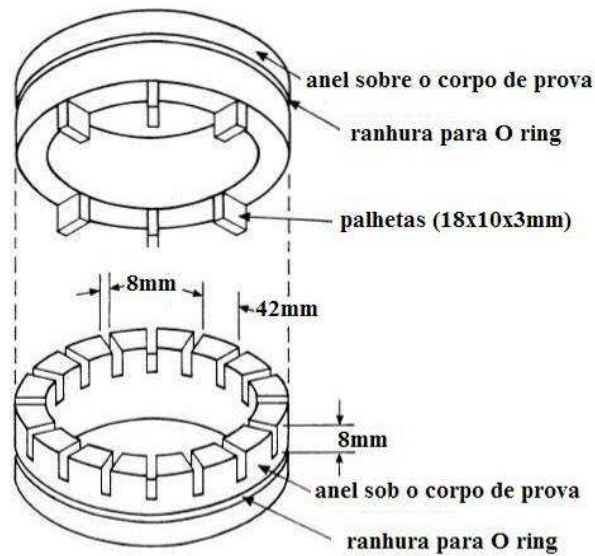


Figura 2.19 – Cabeçote e pedestal desenvolvidos por Chan (1990).

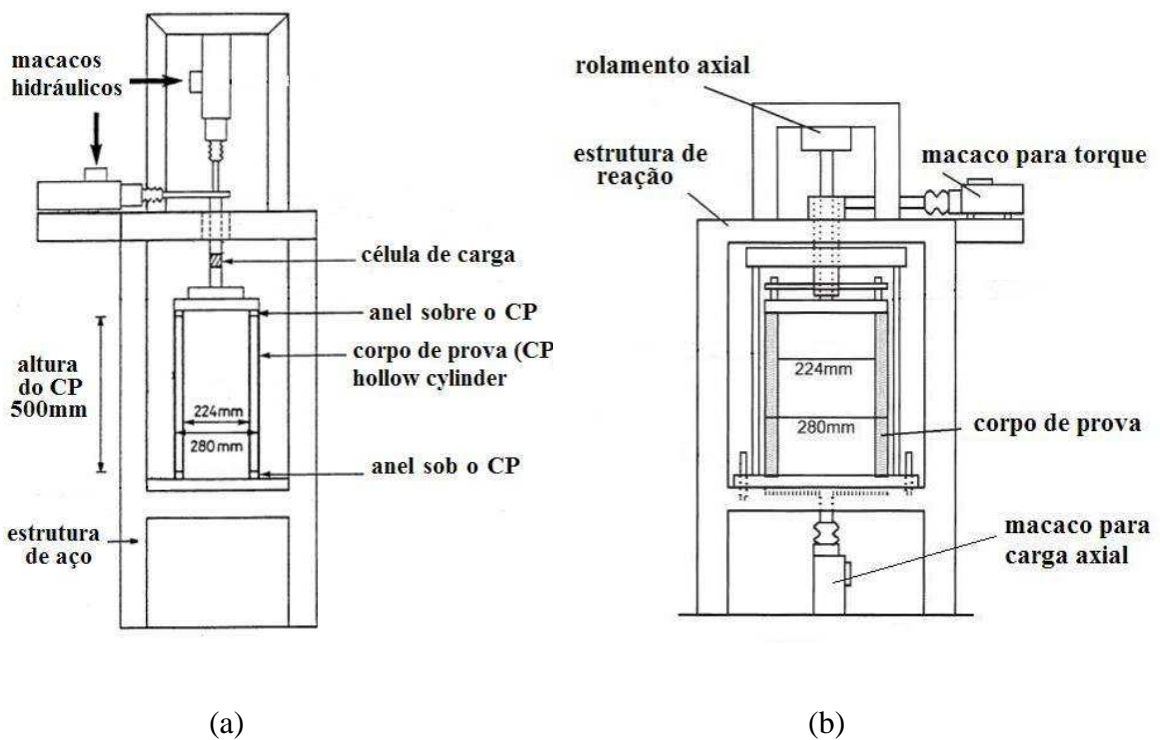


Figura 2.20 – Equipamento hollow cylinder torsional da Nottingham University: (a) primeira versão de O'Reilly (1985); (b) após modificações de Richardson (1999).

Na Europa, ainda podem ser encontrados equipamentos *hollow cylinder torsional* nas seguintes universidades e centros de pesquisa:

(i) Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal – O equipamento foi fabricado pela *GDS Instruments Ltd.* Bile Serra e Hooker⁶ apresentam a sua descrição detalhada e alguns ensaios comprovando seu funcionamento. A Figura 2.21 mostra o *layout* deste equipamento.

(ii) *University College Dublin* na Irlanda – O’Kelly e Naughton (2005) descrevem o equipamento *hollow cylinder torsional*, recentemente desenvolvido nesta universidade (Figura 2.22). O equipamento utiliza corpos de prova com 200mm de altura e diâmetros externo e interno de 100 mm e 71 mm, respectivamente. O sistema de aplicação das cargas se localiza na base do equipamento e é composto por motores de passo e um sistema de polias e rolamentos, que promovem o giro do eixo central e seu deslocamento vertical.

(iii) *École Nationale des Travaux Publics de l’État* (ENTPE) na França – Geoffroy *et al.* (2003) e Sauzéat *et al.* (2003) apresentam o equipamento desenvolvido nesta instituição. Ambos os artigos enfatizam sua aplicabilidade na medição de uma larga faixa de deformações e a precisão do sistema de instrumentação. São utilizados corpos de prova com altura de 120 mm, diâmetro externo de 200 mm e interno de 180 mm. Estas são dimensões peculiares para este tipo de ensaio, uma vez que a relação $h/d_e = 2$ já foi amplamente aceita e adotada na bibliografia internacional, em função de minimizar os efeitos da não uniformidade de tensões e deformações. A Figura 2.23 apresenta seu *layout* e também um esquema da instrumentação local utilizada.

(iv) *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC), também na França – Este equipamento foi construído em 1990 juntamente com outra instituição de pesquisa francesa, porém, somente após uma década de modificações, passou a pertencer exclusivamente ao LCPC. Nasreddine (2004) utilizou este equipamento, que possui as seguintes características: (i) corpos de prova com 150 mm de altura, diâmetros interno e externo de 70 e 100 mm, respectivamente; (ii) torque aplicado sobre o corpo de prova por um motor elétrico que transfere a rotação ao eixo central; (iii) sistema de aplicação de carga axial sob o corpo de prova; (iv) peças que se ajustam ao topo e base do corpo de prova, possuindo discos de pedra porosa embutidos e palhetas com 4mm de altura para auxiliar na transferência do torque às extremidades do corpo de prova; e (v) o

⁶ http://www.gdsinstruments.com/support/pdf/ph_hca_prague2003.pdf (disponível em 01/05/07)

sistema de aplicação de cargas e aquisição automática de dados é automatizado. A Figura 2.24 mostra o *layout* da câmara deste equipamento.

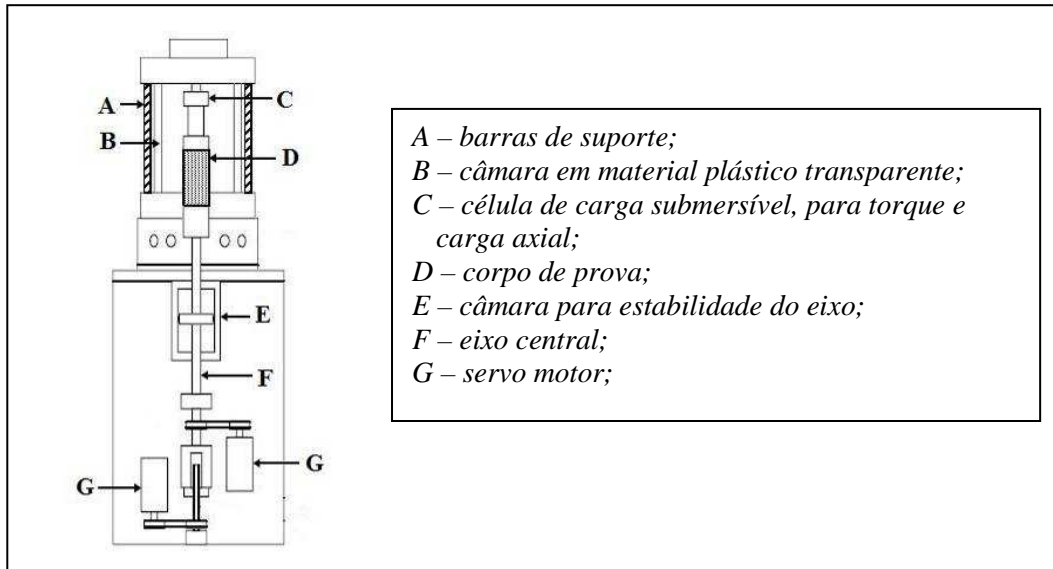


Figura 2.21 – Equipamentos hollow cylinder torsional em Portugal (Bilé Serra e Hooker, 2003)

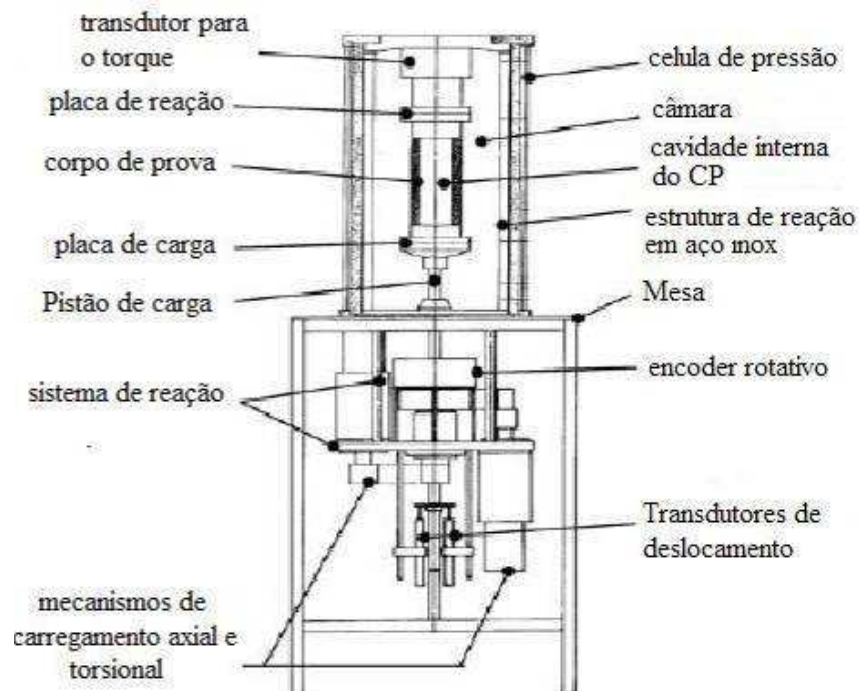


Figura 2.22 – Equipamentos hollow cylinder torsional utilizados no University College Dublin, Irlanda (O’Kelly e Naughton, 2005).

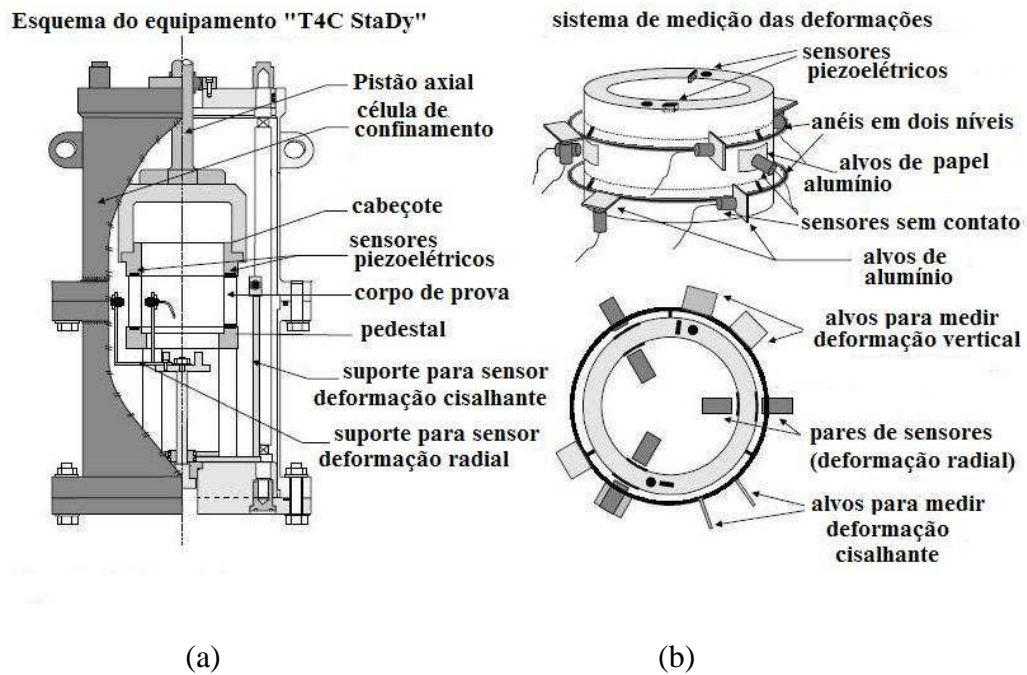


Figura 2.23 - Equipamento hollow cylinder torsional da ENTPE - França (Geoffroy et al., 2003): (a) layout geral e (b) instrumentação local do corpo de prova.

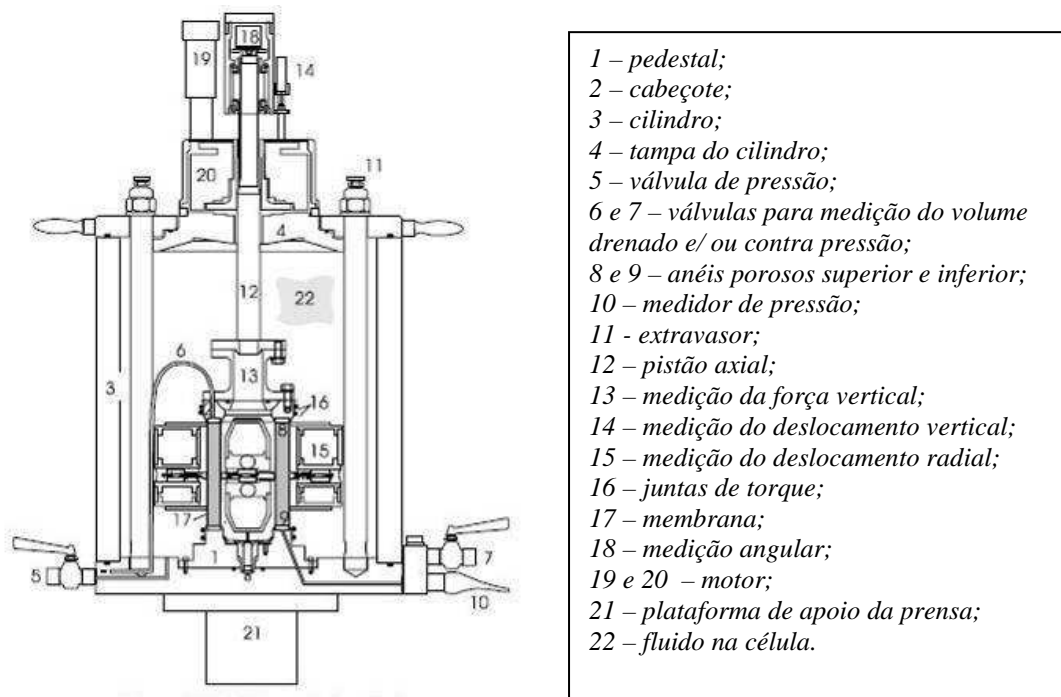


Figura 2.24 - Esquema da câmara do equipamento hollow cylinder torsional do LCPC - França (Nasreddine, 2004):

Na literatura consultada foram encontrados três equipamentos *hollow cylinder* torsionais na *University of Tokyo* (Japão). A descrição destes equipamentos normalmente não é detalhada; a maior parte das publicações encontradas aborda somente a realização de ensaios e a interpretação de seus resultados. Entretanto, foi possível estabelecer uma rede cronológica entre as publicações que os utilizaram, permitindo assim, identificar algumas de suas principais características e as modificações realizadas ao longo dos anos. A seguir uma breve descrição dos equipamentos da *University of Tokyo*, de acordo com os trabalhos que os referenciaram:

(i) No início da década de 80, entrou em operação um equipamento *hollow cylinder torsional* desenvolvido e apresentado por Tatsuoka *et al.* (1982). Os carregamentos vertical e torsional são aplicados por meio de cilindros pneumáticos do tipo *Bellofram* de dupla-ação. O movimento horizontal de um destes cilindros promove a rotação do eixo central sobre o corpo de prova, através de um sistema de polias e roda (Figura 2.25). A aplicação de pressão de confinamento no corpo de prova (interna e externa) é hidrostática. Na ocasião, eram utilizados corpos de prova com altura e diâmetro externo iguais (100 mm) e diâmetro interno de 60 mm. Seis palhetas de aço inoxidável (1,5 mm de espessura) foram fixadas às pedras porosas para garantir a transferência do torque ao corpo de prova. Tatsuoka *et al.* (1986a) modificaram o sistema de aplicação de torque através da inserção de rolamentos, que tornaram a rotação do eixo livre de atrito. Corpos de prova com a relação $h/d_e = 2$ foram utilizados pela primeira vez por Tatsuoka *et al.* (1986b). Modificações neste equipamento são apresentadas também no trabalho de Pradhan *et al.* (1988), destacando-se entre elas o controle independente das pressões interna e externa e a maior precisão na medição da variação de volume do corpo de prova. Ampadu e Tatsuoka (1993) modificaram novamente este equipamento, introduzindo um sistema de medição das deformações mais preciso e totalmente automatizado. A Figura 2.26a mostra um *layout* deste equipamento, apresentado no último trabalho referenciado.

(ii) O segundo equipamento foi introduzido por Ishihara e Towhata (1983). Inicialmente, foram utilizados corpos de prova com 104 mm de altura e diâmetros de 100 mm (externo) e 60 mm (interno). A carga vertical era aplicada através de um cilindro pneumático *Bellofram* e a torsional por meio de um motor elétrico que ocasionava a rotação do eixo central sobre o corpo de prova. Pradel *et al.* (1990)

realizaram modificações neste equipamento, passando a utilizar células de carga para medir a tensão axial e um cilindro *Bellofram* para aplicar o torque (sistema similar ao utilizado pelo equipamento desenvolvido por Tatsuoka *et al.*, 1982). O corpo de prova passa a ter uma altura de 193mm, enquanto os diâmetros externo e interno mantêm as mesmas dimensões. Yoshimine *et al.* (1998) também utilizaram este equipamento e apresentaram uma versão completamente automatizada dos sistemas de aplicação de cargas e medição de tensões e deformações. Na Figura 2.26b é apresentado um desenho esquemático do seu *layout* e dos sistemas de automação.

(iii) No artigo de Miura *et al.* (1986a) foi identificado o terceiro equipamento. Neste equipamento são utilizados corpos de prova com altura de 200 mm, diâmetro externo de 100 mm e diâmetro interno de 60 mm. No pedestal e no cabeçote, são acoplados oito discos de pedra porosa com 10 mm de diâmetro e oito palhetas com 2 mm, 0,5 mm e 16 mm de altura, espessura e comprimento, respectivamente. Não constam descrições sobre as demais características do equipamento, apenas uma figura que ilustra os sistemas de aplicação e medição de carga (Figura 2.26c). Segundo a observação do esquema apresentado nesta figura, os sistemas de aplicação de carga são similares aos empregados nos outros equipamentos da mesma universidade. Nakata *et al.* (1998) também utilizaram este equipamento, mas não o descrevem, apenas citam que os sistemas de aplicação de cargas e de medição de tensões e deformações são controlados por computador, e que a direção e velocidade do torque são controladas por um motor de passo.

Em uma pesquisa realizada na *internet*, foram encontrados mais dois equipamentos *hollow cylinder torsional* em funcionamento no Japão, um na *Kyoto University*⁷ e outro na *Tokyo Metropolitan University*⁸. Na China, a *Hong Kong University of Science and Technology*⁹ também possui este tipo de equipamento.

⁷ <http://nakisuna2.kuciv.kyoto-u.ac.jp/okalabo1/OkalabApparatusforHP.pdf> (disponível em 01/05/07)

⁸ <http://geot.civil.metro-u.ac.jp/facilities/facilities.html> (disponível em 01/05/07)

⁹ http://www.ce.ust.hk/facility_geotech.asp (disponível em 01/05/07)

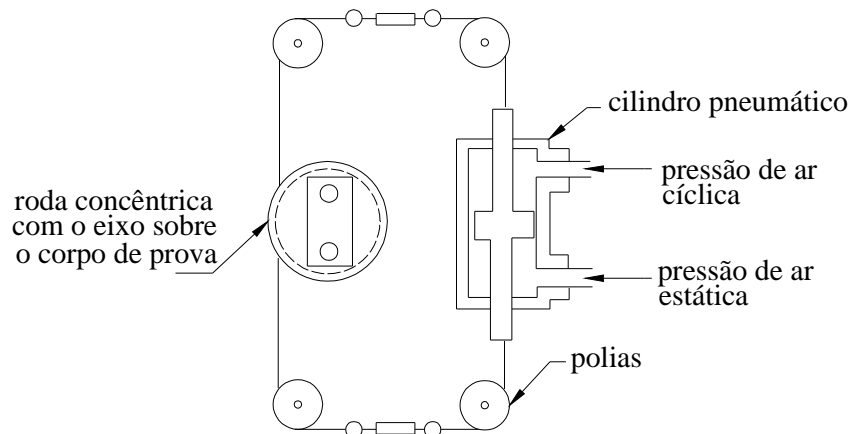
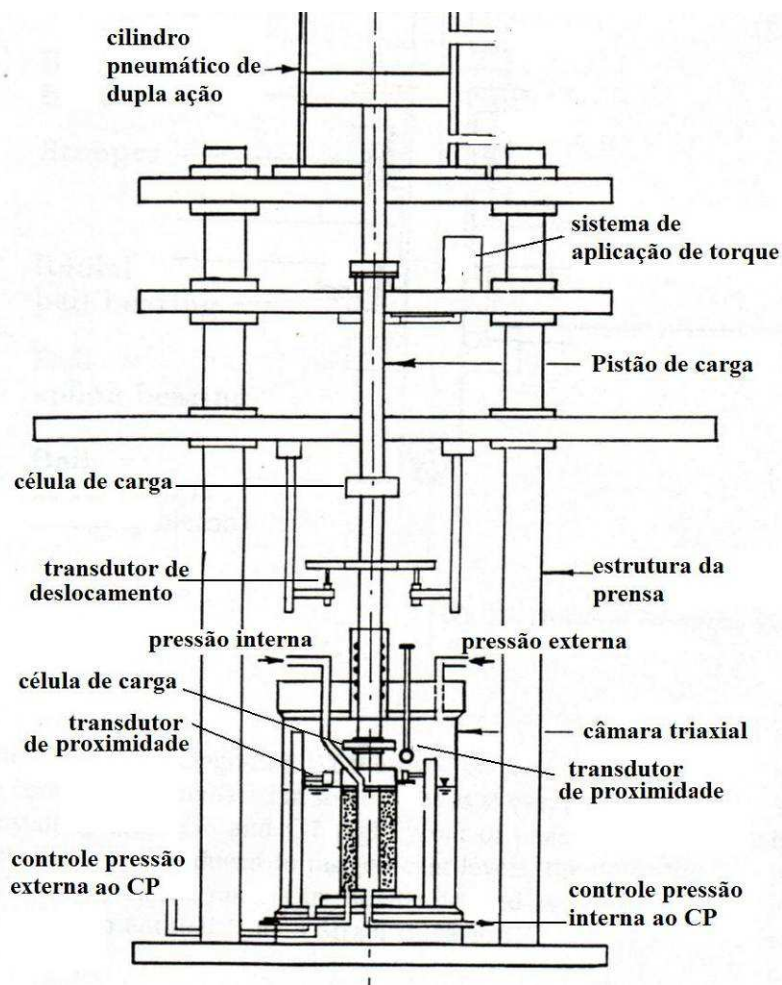
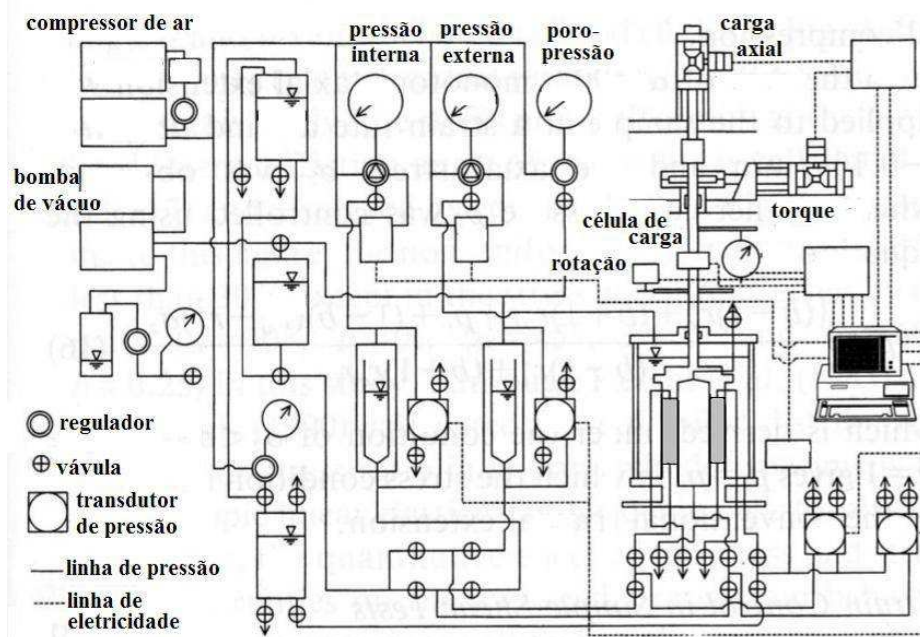


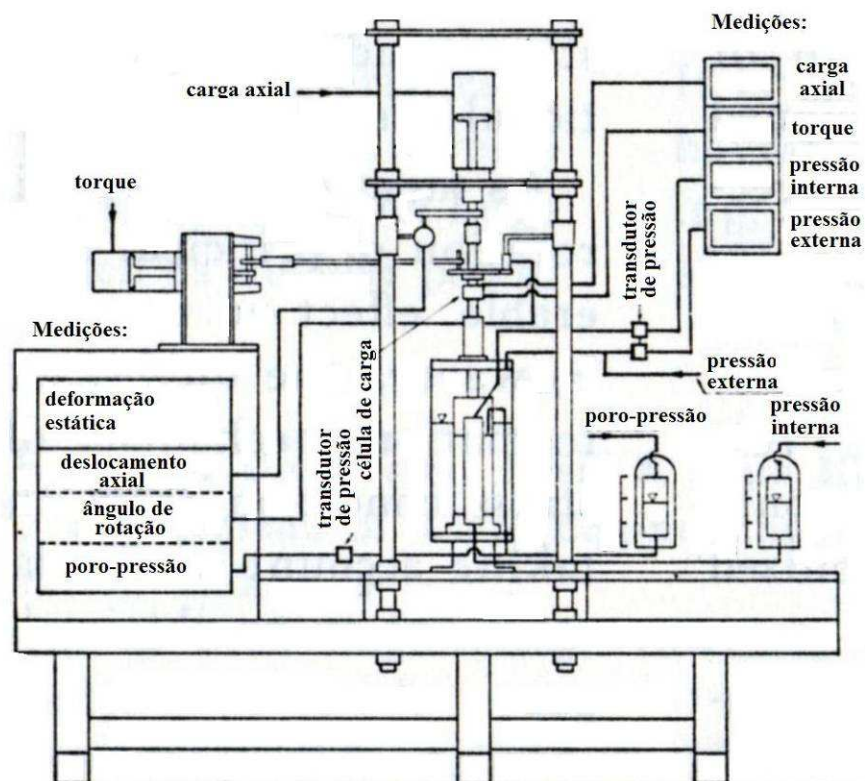
Figura 2.25 – Sistema de aplicação de torque utilizado por Tatsuoka et al. (1982).



(a)



(b)



(c)

Figura 2.26 – Equipamentos *hollow cylinder torsional* da *University of Tokyo*: (a) Ampadu e Tatsuoka (1993), (b) Yoshime *et al.* (1998), e (c) Miura *et al.* (1986a).

Sayão (1989) e Vaid *et al.* (1990) descrevem com detalhes o equipamento *hollow cylinder torsional* desenvolvido na *University of British Columbia* no Canadá. O projeto de montagem iniciou em 1984 e, dois anos após, o equipamento entrou em operação. Um desenho esquemático deste equipamento é apresentado na Figura 2.27a. Para os corpos de prova foram adotadas as seguintes dimensões: 302 mm de altura, 152 mm de diâmetro externo e 102 mm de diâmetro interno. O cabeçote e o pedestal são ranhurados (com 1 mm de espessura e 2,3 mm de profundidade) e possuem pequenos discos de pedra porosa embutidos (com diâmetro de 12,8 mm). Os carregamentos vertical e torsional são aplicados pela base do corpo de prova. O torque é aplicado através de dois pares de cilindros pneumáticos de dupla ação, conectados a um sistema de cabos e polias que promove o giro do eixo central sob o corpo de prova (Figura 2.27b). Na ocasião da publicação dos trabalhos referenciados, as tensões e deformações eram medidas por nove transdutores conectados ao sistema de aquisição de dados. Segundo o *site* do *Geotechnical Research Group* da *University of British Columbia*¹⁰, este equipamento atualmente opera com corpos de prova menores, com 150 mm de altura, 100 mm de diâmetro externo e 69 mm de diâmetro interno. No mesmo *site* também são apresentadas as características do sistema de aquisição de dados e da instrumentação utilizada atualmente.

Nos Estados Unidos da América foram localizados equipamentos *hollow cylinder torsional* nas seguintes universidades:

- (i) *University of Califórnia, Los Angeles* - Lade (1981) descreve em detalhes um equipamento desenvolvido nesta universidade. Utiliza corpos de prova de 400 mm de altura, 220 mm de diâmetro externo e 180 mm de interno. No trabalho de Hong e Lade (1989) são utilizados corpos de prova com os mesmos diâmetros externo e interno, porém com 250 mm de altura. Dois pares de cilindros *Bellofram* são responsáveis pela transferência do torque ao corpo de prova. Todo o sistema de aplicação de cargas situa-se sob o corpo de prova. A Figura 2.28 mostra os detalhes do equipamento em um corte esquemático. Não foram encontradas bibliografias mais atuais que citem o uso deste equipamento.

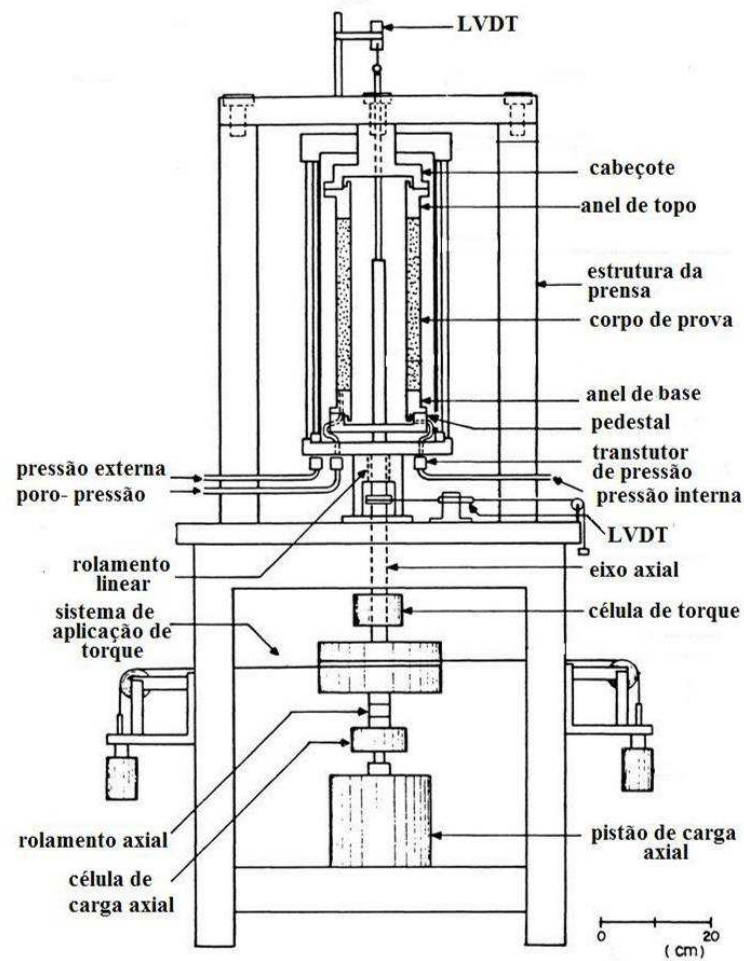
¹⁰ <http://www.civil.ubc.ca/research/geotech/gradlab/hollow.htm> (disponível em 01/05/07)

(ii) *Colorado State University* e *Purdue University* – Ambas possuem equipamentos fabricados pela *Wykeham Farrance Int.*. Adaptações e modificações foram realizadas e recentemente estes equipamentos entraram em operação¹¹.

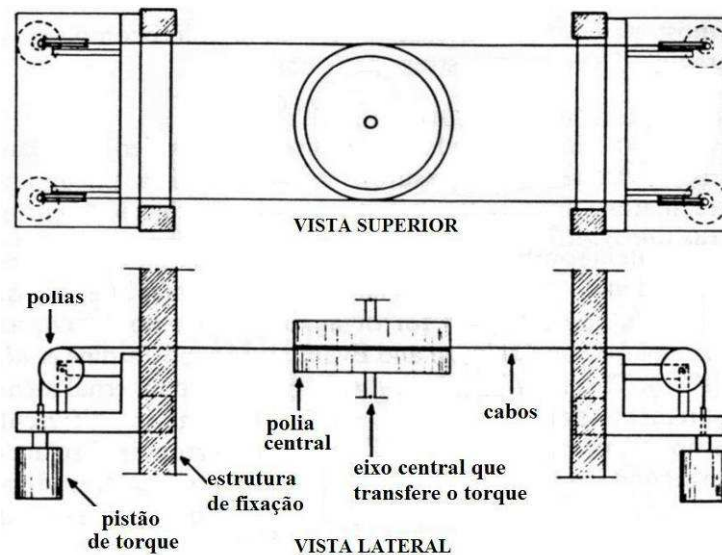
Talesnick e Frydman (1991) apresentam um equipamento *hollow cylinder torsional* desenvolvido no *Israel Institute of Technology (Technion)* em Israel. São utilizados corpos de prova com altura de 120 mm e diâmetros externo e interno de 71 mm e 50 mm, respectivamente. As cargas são aplicadas pelo topo do corpo de prova - a carga axial por meio de um cilindro *Bellofram* de dupla ação e a torsional por um motor de passo. Uma célula de carga combinada, desenvolvida na própria instituição, mede estes esforços. As pressões na câmara são aplicadas e controladas por controladores de pressão fabricados pela empresa *GDS Instruments Ltd.* Foi desenvolvido, também, um equipamento específico para moldagem de corpos de prova *de argila para o ensaio hollow cylinder* (Talesnick e Fridman, 1990). Atualmente, Talesnick trabalha com mecânica das rochas no *Technion*, e desenvolveu um equipamento e uma metodologia para caracterizar o seu comportamento tensão-deformação. Esta metodologia envolve ensaios com a aplicação de diferentes estados de tensão como: compressão axial, compressão radial e torção em corpos de prova do ensaio *hollow cylinder* (Talesnick e Ringel, 1999; Talesnick *et al.* 2000 e 2001).

O levantamento bibliográfico realizado nesta pesquisa também encontrou um equipamento *hollow cylinder torsional* na *Istanbul Technical University* (Turquia). Este equipamento utiliza corpos de prova com 195 mm de altura, 100 mm de diâmetro externo e 60 mm de interno. No trabalho de Yoshimine *et al.* (1999) um novo sistema automatizado de medição e controle das tensões e deformações é apresentado.

¹¹ Informações fornecidas por professores destas instituições.



(a)



(b)

Figura 2.27 – (a) layout do equipamento *hollow cylinder torsional* de *British Columbia* e (b) detalhe do seu sistema de aplicação de torque (Vaid *et al.*, 1990).

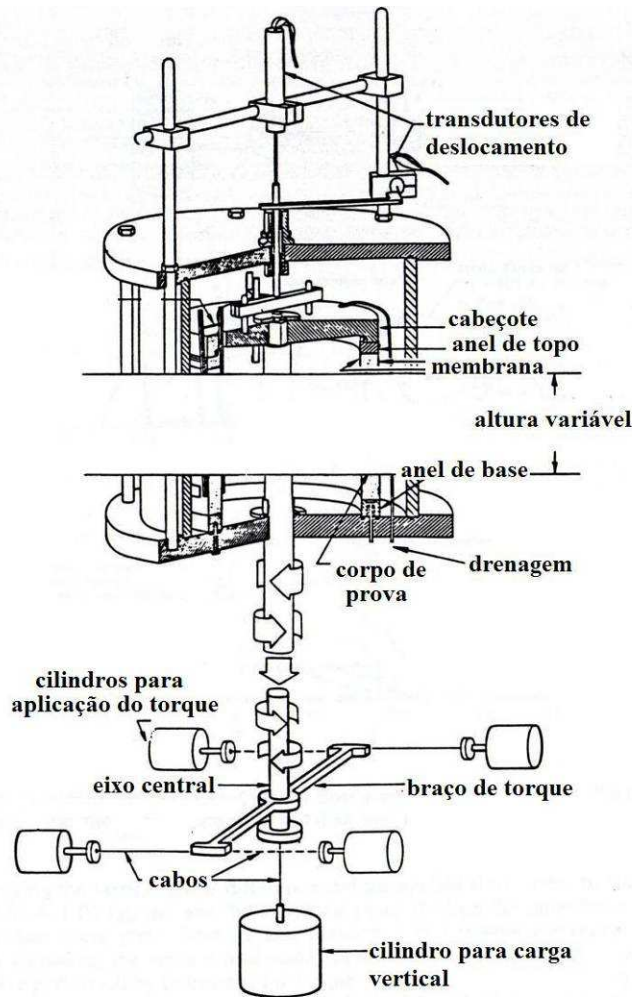


Figura 2.28 – Equipamento *hollow cylinder torsional* da UCLA (Hong e Lade, 1989).

2.3 Comportamento de materiais granulares empregados em camadas de pavimentos

As camadas granulares possuem um importante papel estrutural no desempenho de pavimentos flexíveis. A rotação das tensões principais em camadas granulares de um pavimento tem uma forte influência no acúmulo de suas deformações plásticas, que contribuem para o afundamento de trilha de rodas na superfície dos pavimentos flexíveis (Brown, 1996).

2.3.1 Comportamento tensão-deformação

As tensões geradas em um pavimento pela passagem das rodas dos veículos, apresentam uma configuração complexa; com pulsos de tensões verticais, horizontais e cisalhantes. Em camadas granulares, as tensões verticais e horizontais são positivas, enquanto a tensão

cisalhante é revertida com a passagem da carga, que causa a rotação das tensões principais. Em um pavimento submetido ao carregamento ocasionado pela passagem de veículos, o estado de tensões, em um elemento do subleito ou de outra camada inferior do pavimento, varia com a posição da carga móvel. Quando a carga está situada diretamente em cima do elemento considerado, a tensão vertical ocasionada por este carregamento é igual à tensão principal maior σ_1 e a tensão horizontal, igual à tensão principal menor σ_3 (Figura 2.29a). Este estado de tensões caracteriza o plano de tensões principais, onde as tensões cisalhantes são nulas. Entretanto, quando a carga se encontra deslocada a uma distância x deste mesmo ponto, ocorrem tensões cisalhantes, porque o eixo de aplicação da carga não coincide com o eixo vertical deste elemento. Portanto, para este ponto de aplicação de carga há um novo plano de tensões principais, defasado do anterior por um ângulo α (Figura 2.29b). A Figura 2.30 ilustra a distribuição das tensões que ocorrem em um elemento do pavimento durante a passagem de veículos, em um gráfico de tensões versus tempo.

A deformação de camadas granulares submetidas ao tráfego de veículos é formada por duas parcelas: a deformação recuperável (resiliente) e a deformação residual (permanente), como ilustra a Figura 2.31. Segundo Luong (1982) *apud* Lekarp *et al.* (2000a) a deformação de solos granulares, submetidos a um carregamento, é resultante de mecanismos distintos, que estão relacionados ao conjunto de partículas, como o adensamento e o rearranjo destas, e ao desgaste pelo atrito e quebra das mesmas. Quando o comportamento de um solo granular é observado a nível microscópico, nota-se que a deformação é composta por uma parcela volumétrica e outra cisalhante. Ambos os tipos de deformações resultam da combinação dos mecanismos de deformação mencionados. O rearranjo das partículas contribui principalmente para a ocorrência de deformações cisalhantes, enquanto o adensamento gera uma contribuição maior na deformação volumétrica. Entretanto, a separação entre estes dois tipos de deformação é muito difícil de ser quantificada, então a deformação cisalhante em materiais granulares, é normalmente associada à deformação volumétrica (Lekarp *et al.*, 2000a).

A literatura mostra que o nível de tensões é um dos fatores que mais afeta o desenvolvimento de deformações permanentes em materiais granulares. Lekarp *et al.* (2000b) revisou trabalhos de vários autores que reportam esta dependência, através da análise de resultados de ensaios triaxiais de carga repetida:

- Morgan (1966) observou que o acúmulo de deformação permanente axial é diretamente relacionado à tensão desvio e inversamente relacionado à pressão de confinamento;

- Lashine *et al.* (1971) e Brown e Hide (1975) observaram que as deformações permanentes se estabilizavam em um valor constante para uma determinada razão entre tensão desvio e pressão de confinamento;

Vários autores (Morgan, 1972; Thom, 1988 e Paute *et al.* 1993) tentaram explicar o comportamento das deformações permanentes, ocasionadas pelo carregamento repetido, utilizando a resistência ao cisalhamento do material na ruptura, com carregamento estático. Lekarp e Dawson (1998) questionam esta relação, pois acreditam que a ruptura em materiais granulares submetidos ao carregamento repetido, que ocorre de maneira gradual, é diferente da ruptura que ocorre de maneira súbita no carregamento estático. Chan (1990) enfatiza que correlações entre ensaios de carregamento estático e a deformação permanente obtida em ensaios de carregamento repetido, é bastante perigosa. As cargas estática e repetida não necessariamente provocam a mesma mudança na estrutura dos materiais granulares, e apesar destas aproximações possuírem um forte potencial para aplicação prática, seus resultados nem sempre são adequados.

O efeito da rotação das tensões principais na deformação permanente ainda não é completamente compreendido. Um dos principais motivos é que o ensaio mais utilizado para simular as condições do tráfego em laboratório, o ensaio triaxial de carregamento repetido, não consegue promover uma mudança contínua na direção da tensão principal (Lekarp *et al.*, 2000b). A bibliografia disponível mostra que há um forte acréscimo na deformação permanente quando ocorre a rotação das tensões principais durante o ensaio. Este comportamento pode ser verificado nos trabalhos de Youd (1972) e Ansell (1977) através de ensaios do tipo *simple shear*, e de Chan (1990) e Chan e Brown (1994) com ensaios *hollow cylinder* torsionais.

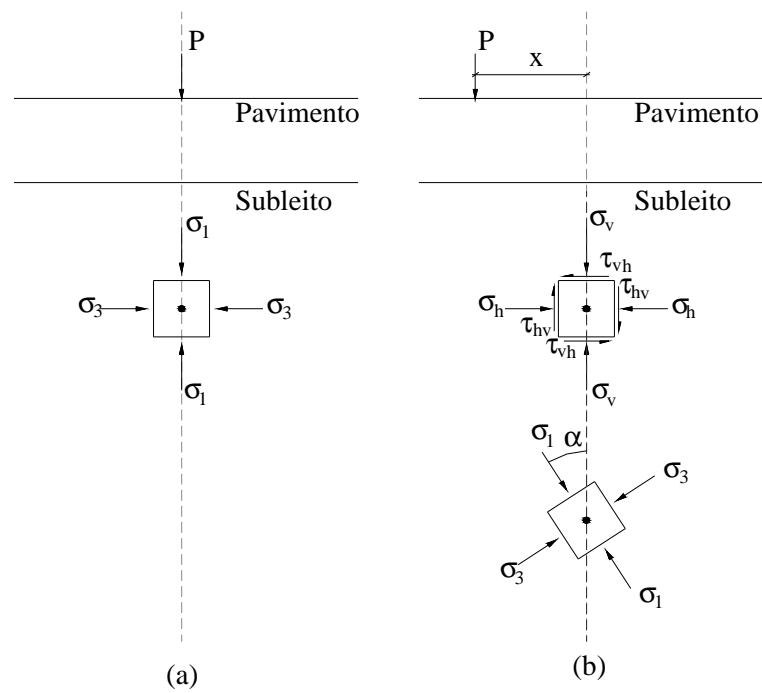


Figura 2.29 – Variações de tensões em elemento de solo causadas por uma carga móvel.

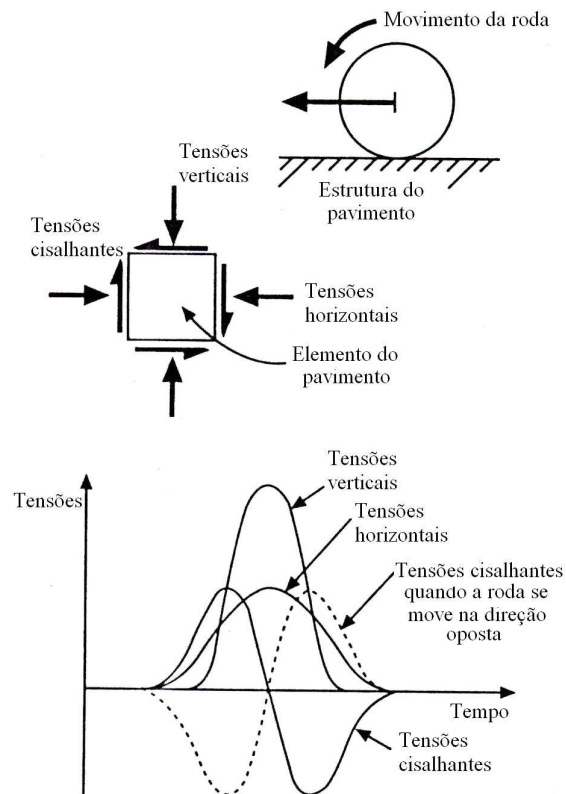


Figura 2.30 – Variações de tensões em elemento de pavimento em função do tempo, provocadas pela passagem dos veículos.

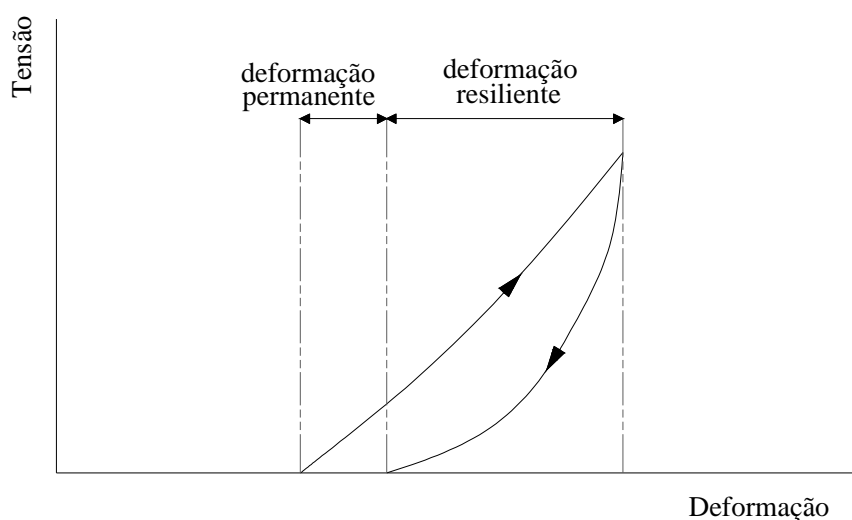


Figura 2.31 – Deformação em materiais granulares durante um ciclo de aplicação de carga.

2.3.2 Estudo do comportamento tensão-deformação em laboratório

Além do equipamento *hollow cylinder torsional*, outros equipamentos também tentam simular em laboratório as solicitações que ocorrem nas camadas inferiores do pavimento, devidas a passagem dos veículos. Com o objetivo de simular a rotação das tensões principais ocasionadas pela passagem de veículos, foi desenvolvido na *University of Illinois* um equipamento denominado *Fast-Cell* para estudar o comportamento de solos e agregados (Tutumluer e Seyhan, 2000). Este equipamento consiste em uma câmara triaxial, capaz de aplicar carregamento axial cíclico e pressão confinante cíclica, oferecendo as seguintes configurações de ensaios: (i) aplicação de pressão confinante variável durante o carregamento vertical repetido; (ii) pulso de carga vertical e radial independentes; a aplicação pode ser simultânea ou defasada, e (iii) reversão da direção do carregamento principal através da aplicação do pulso de tensão radial maior que o vertical. Segundo Tutumluer *et al.* (2000), o carregamento dinâmico ocasionado pela passagem da roda dos veículos não pode ser simulado em ensaios de laboratório com a pressão de confinamento estática. A pressão de confinamento dinâmica em ensaios triaxiais de carga repetida oferece a possibilidade de obter diferentes trajetórias de tensões. Em campo também ocorrem carregamentos de extensão a uma determinada distância do centro de carregamento da roda, onde a tensão de confinamento é maior que a tensão axial; esta situação pode ser simulada neste equipamento.

Para caracterizar o comportamento quanto a deformações permanentes de diferentes materiais granulares, Lekarp *et al.* (1996) realizaram ensaios utilizando um equipamento triaxial com carregamento repetido, que possui aplicação de carga cíclica axial e confinante, e um equipamento *hollow cylinder torsional*. O objetivo principal do trabalho foi estimar uma relação entre a deformação permanente axial total, o número de aplicações de carga e o nível de tensões. Estas estimativas foram feitas através de um modelo francês de ajuste (Paute *et al.*, 1993), que não apresentou correlações satisfatórias com os ensaios realizados. Posteriormente, Lekarp e Dawson (1998) apresentaram outra tentativa de modelar o comportamento de materiais granulares, com base nos mesmos resultados de ensaios. Neste trabalho foram obtidas boas correlações com o modelo proposto no artigo.

Youd (1972) analisou a compactação de areias através de ciclos repetidos de deformação cisalhante em um equipamento *simple shear*. O aumento da densidade através da compactação das areias depende do rearranjo de partículas. Em uma revisão de outros trabalhos, o autor ilustra que há um forte acréscimo de densidade com as deformações cisalhantes cíclicas, pois deformações volumétricas originadas por cargas axiais cíclicas apresentam um incremento significativo apenas no início, mas depois tendem a estabilizar, sem que ocorra a completa densificação da amostra. Por meio da imposição de tensões cisalhantes cíclicas em um ensaio *simple shear*, o autor alcançou valores de densidade da areia elevados e confirmou que a deformação cisalhante é que comanda a compactação das areias.

Chan (1990) realizou ensaios *hollow cylinder torsional* com o objetivo principal de estudar o efeito da aplicação de tensões cisalhantes na deformação permanente de materiais granulares. O autor realizou ensaios com e sem aplicação de tensão cisalhante (condição triaxial) e também analisou a diferença da aplicação da rotação nos sentidos unidirecional e bi-direcional. Para fins de comparação da deformação permanente, também foram realizados ensaios em um equipamento triaxial de carga repetida. Apesar de ter realizado um número limitado de ensaios, o autor verificou a nítida influência nas deformações permanentes devido à aplicação de tensões cisalhantes. Ensaios com carregamento bi-direcional em geral apresentaram deformações permanentes verticais maiores que os ensaios com carregamento unidirecional. Este comportamento foi confirmado pela realização de dois ensaios

laboratoriais de grande escala¹², no mesmo material. Os resultados dos ensaios triaxiais de carga repetida foram muito próximos aos ensaios realizados no equipamento *hollow cylinder torsional*, sem aplicação de tensão cisalhante. Foram realizados também uma série de ensaios *hollow cylinder* torsionais, com diferentes estados de tensão, intitulados pelo autor de “ensaios de 50 ciclos”. Estes ensaios de curta duração eram divididos em duas partes, sem e com aplicação de tensão cisalhante durante o ensaio. A Figura 2.32 apresenta um gráfico que ilustra os resultados destes ensaios, onde é possível verificar claramente a influência da rotação das tensões principais, através do aumento da deformação axial permanente, após a introdução do carregamento torsional cíclico no corpo de prova. Também foi possível observar, nestes ensaios, que o acúmulo de deformações permanentes varia linearmente com o logaritmo do número de ciclos de carga, para ambas as fases (sem e com cisalhamento), porém com uma taxa diferente. A Figura 2.33 apresentada pelo autor ilustra este comportamento. Esta campanha de ensaios foi realizada com um agregado fino de calcário dolomítico, com tamanho máximo de partícula de 5mm. Algumas de principais conclusões deste trabalho podem ser encontradas também em Chan e Brown (1994). É importante salientar que, em ensaios onde há carregamento axial cíclico combinado com tensões cisalhantes cíclicas, os pulsos de carga são defasados entre as duas tensões, de modo que, quando a tensão axial for máxima, a tensão cisalhante é nula.

Com o objetivo de investigar a relação entre a anisotropia e a direção da tensão principal maior em materiais granulares, Richardson (1999) realizou uma vasta campanha de ensaios em um equipamento *hollow cylinder torsional*. Sua pesquisa foi realizada no núcleo de pavimentação da *University of Nottingham (Pavement and Geotechnics Research Group)*, portanto foi dada ênfase à simulação do comportamento tensão-deformação de um elemento de solo submetido ao movimento de passagem dos veículos. Cada passagem de roda sobre a superfície de um pavimento corresponde a uma mudança de magnitude e direção da tensão cisalhante nos planos horizontal e vertical, resultando numa rotação cíclica da tensão principal maior que corresponde a uma variação de α de $\pm 45^\circ$. O programa de ensaios também se estendeu à observação do comportamento de estados de tensões que ocorrem em terremotos ($\pm 90^\circ \leq \alpha$). Richardson (1999) realizou dois tipos de ensaios com carregamento monotônico, em corpos de prova virgens, e corpos de prova submetidos a uma fase de carregamento cíclico. Este procedimento faz com que os corpos de prova comecem o ensaio em diferentes

¹² Ensaios de grande escala: *Pavement test facility* e *Slab test facility*, ambos equipamentos pertencentes ao *Nottingham Transportation Engineering Center* da *Nottingham University*.

condições, simulando a existência ou não de uma história de tensões. Nos ensaios de carregamento repetido foram avaliados os comportamentos em relação às deformações permanente e resiliente. Dois materiais foram usados nesta pesquisa, uma areia densa de granulação fina e outra medianamente densa, com granulação similar. A anisotropia inicial do material foi definida nos ensaios de carregamento monotônico, de acordo com a relação entre α (inclinação da tensão principal maior) e η_f (relação q/p na ruptura). Esta relação serviu de base para os intervalos de carregamento dos ensaios cíclicos. Cabe salientar que o autor não levou os ensaios monotônicos à ruptura, para que não ocorresse a danificação da instrumentação local dos corpos de prova. Os valores de η_f foram determinados através de diferentes critérios de correlação entre deformação e ruptura. A Figura 2.34 mostra as trajetórias de tensão aplicadas durante o carregamento monotônico, para diferentes valores de α , na areia densa.

No carregamento monotônico, Richardson (1999) observou que, nos ensaios com corpos de prova virgens, ambos os materiais apresentaram uma forte influência do valor de α . Em geral, quanto maior o valor de α , menor o valor de η_f . A deformação volumétrica também é sensível ao valor de α ; ocorre uma transição da contração para a dilatação, à medida que α aumenta. Já nos ensaios com carregamento monotônico em corpos de prova submetidos previamente a um carregamento cíclico, pode-se observar que: (i) a variação volumétrica durante o carregamento monotônico foi principalmente influenciada pela mudança do índice de vazios que ocorreu na fase do carregamento cíclico; e (ii) a deformação cisalhante foi mais influenciada pela direção da tensão principal imposta ao ensaio. Com base nos resultados dos ensaios de carregamento repetido, Richardson (1999) apresentou as seguintes conclusões: (i) a deformação permanente desenvolvida nos primeiros 10 ciclos tem uma significativa influência na taxa de deformação permanente acumulada durante o resto do ensaio; (ii) ambas as deformações resilientes, cisalhante e volumétrica, são função do valor de η , porém a cisalhante parece não ser influenciada pelo valor de α , ao contrário do que ocorre na volumétrica. Apesar de ter sido realizado um grande número de ensaios e vários estados de tensões terem sido simulados, o autor apresenta conclusões pouco qualitativas, e muito menos quantitativas. Correlações com o comportamento de campo, apresentadas nos seus objetivos iniciais, também não ficaram claras ao concluir o trabalho. Variações nos resultados podem estar associadas aos critérios de extrapolação para definir a ruptura, adotados pelo autor no começo dos ensaios; o próprio autor cita que comparações são complicadas nestes casos.

Além disso, muitas correlações foram definidas com base nestas extrapolações, havendo assim a possibilidade de se propagar uma interpretação incorreta de certos resultados. Entretanto, este trabalho apresentou um grande número de resultados, que foram importantes para exemplificar os resultados de ensaios com carregamento repetido (axial e torsional), abordando diferentes combinações de estados de tensões. O equipamento utilizado foi desenvolvido na *University of Nottingham*, na década de 90, com o objetivo de estudar o comportamento tensão-deformação de materiais granulares, submetidos ao movimento das rodas de veículos sobre pavimentos e ferrovias. A concepção do equipamento foi influenciada pelos estudos desenvolvidos no *Imperial College* (Hight, 1986), porém foram feitas adaptações para incluir a aplicação de carregamento cíclico. A descrição detalhada deste equipamento pode ser encontrada nos trabalhos de Richardson (1999) e Brown e Richardson (2004).

Equipamentos *hollow cylinder torsional* também podem ser utilizados para o estudo do comportamento resiliente e determinação de deformações permanentes em misturas asfálticas. Sousa *et al.* (1991) realizaram uma extensa campanha de ensaios para o estudo de deformações permanentes no concreto asfáltico, incluindo ensaios torsionais em corpos de prova *hollow cylinder*. Segundo informações do EPSRC¹³ (*Engineering and Physical Sciences Research Council*) um novo equipamento *hollow cylinder torsional* está sendo desenvolvido na *University of Nottingham* em parceria com a *University of California*, para o estudo do afundamento de trilhas de roda em misturas asfálticas. Este projeto iniciou em setembro do corrente ano sob a supervisão dos professores S.F. Brown e A.C. Collop da *University of Nottingham*.

¹³ <http://gow.epsrc.ac.uk/ViewGrant.aspx?GrantRef=EP/F028512/1>

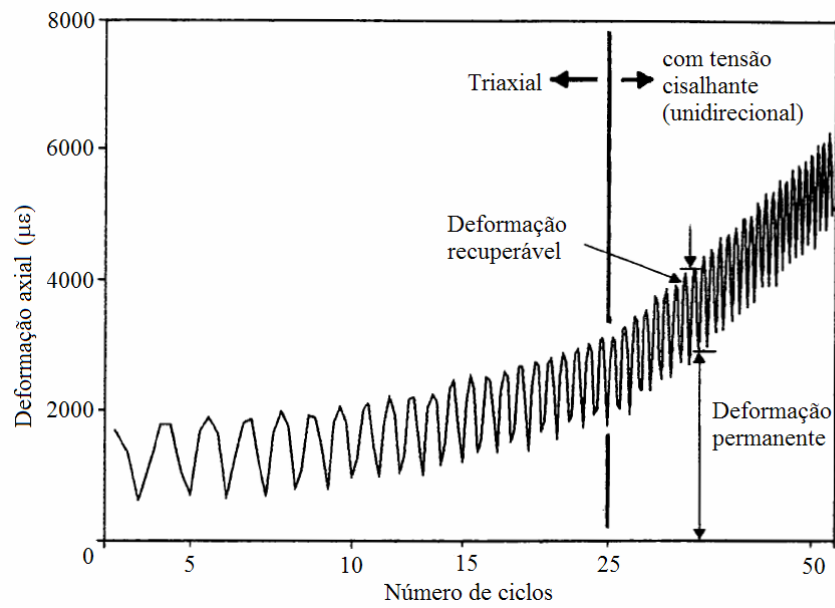


Figura 2.32 – Influência da rotação das tensões principais nas deformações permanentes acumuladas no ensaio *hollow cylinder torsional* (Chan,1990).

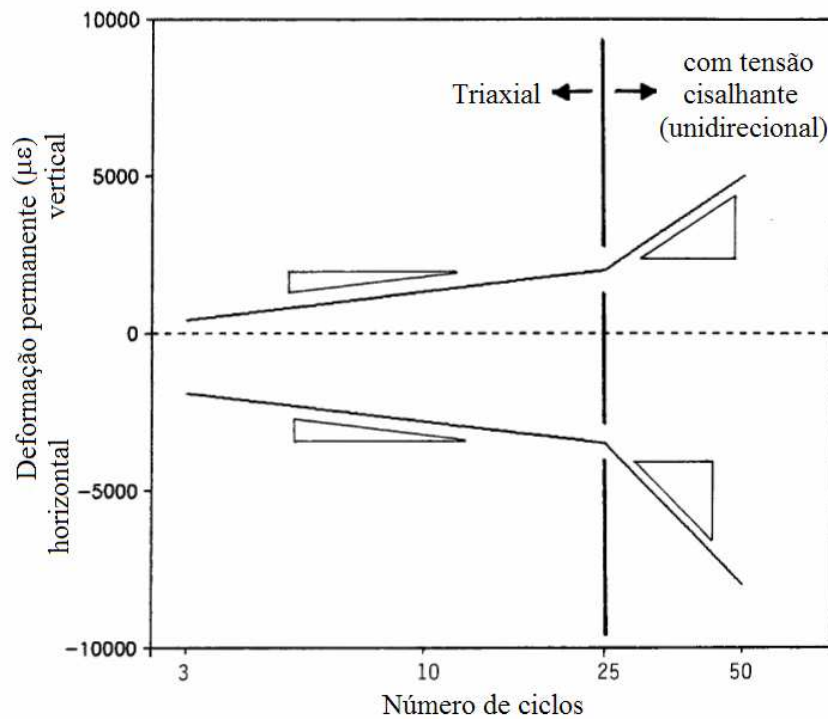


Figura 2.33 – Variação linear da deformação permanente com o logaritmo do número de ciclos de carga, conforme apresentado por (Chan, 1990).

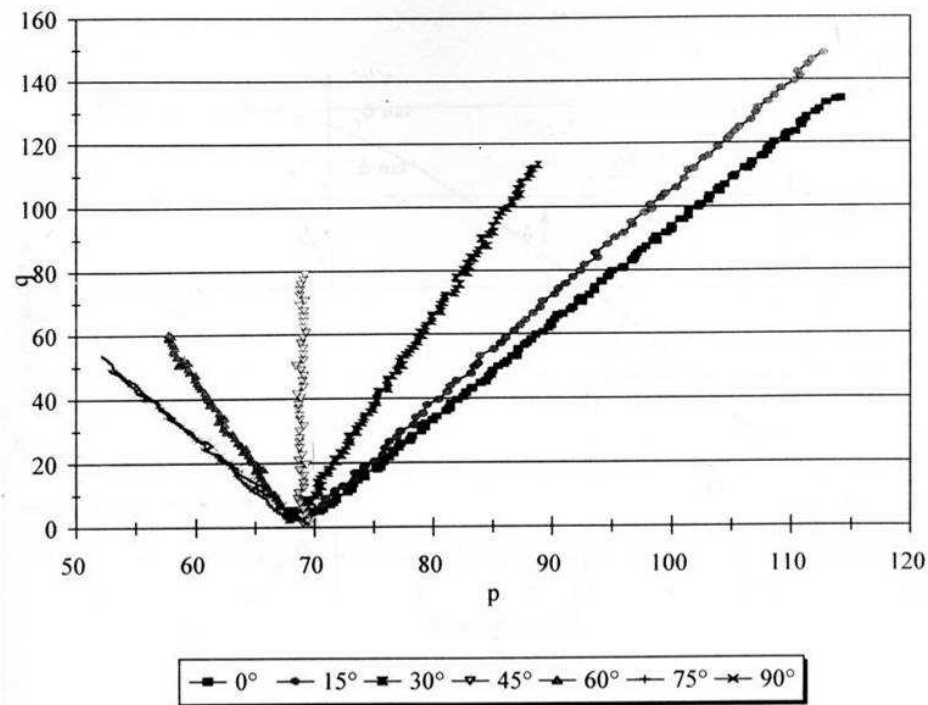


Figura 2.34 – Trajetórias de tensão aplicadas no carregamento monotônico para $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ (Richardson, 1999).

2.4 O solo residual de arenito Botucatu

O material utilizado nesta pesquisa é geologicamente reconhecido como um solo residual de arenito Botucatu. Segundo análise macroscópica realizada por Martins (2001), este material apresenta uma estratificação plano-paralela, cruzada em escala de afloramento, de origem eólica. O grau de intemperismo é bastante pronunciado, a cor é rosa e não apresenta deformações tectônicas. Resultados apresentados por Núñez (1991) e Martins (2001) são particularmente relevantes para esta pesquisa, pois foram obtidos a partir de um solo residual de arenito Botucatu da mesma jazida.

2.4.1 Aspectos geológicos da Formação Botucatu

A Formação Botucatu foi pela primeira vez descrita por Campos (1889), seguido por outros autores, entre os quais Oliveira (1916, 1927, 1930), Tommasi (1972) e Mühlmann et al. (1974), todos citados na descrição geológica do Projeto Radam Brasil (IBGE, 1986). A Formação Botucatu é descrita como um espesso pacote de arenito eólico estratigraficamente situado abaixo das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, tendo sido depositado em condições desérticas, podendo alcançar espessuras superiores a 200 metros.

Esta formação abrange uma área superior a 1.300.000 km², desenvolvendo-se na Bacia do Paraná, desde o Rio Grande do Sul, penetrando no território uruguaio, no nordeste da Argentina e no leste do Paraguai, até os Estados de Mato Grosso e Rondônia. Estes arenitos ocorrem sotopostos e intercalados aos derrames basálticos, além de sobrepostos às Formações Rosário do Sul e Rio do Rastro. A intercalação de arenitos da Formação Botucatu e rochas vulcânicas da Formação Serra Geral indica que a idade da unidade é o Cretáceo Inferior, correspondente a 130 milhões de anos (Rocha-Campos *et al.*, 1988).

Estes arenitos são de natureza eólica, de classes modais dominantes (tamanho de grão) de areia fina e grossa, sem matriz significativa, com estratificação granulométrica fina e apresentando estratificação cruzada de porte médio a grande e tangencial na base. Esta estratificação é formada pela deposição de areia por acreção (rolamento sobre a frente das dunas) ou avalanche na frente das dunas. Quanto à coloração, são avermelhados, rosa ou esbranquiçados. São normalmente quartzosos, friáveis devido à matriz reduzida, apresentando grãos foscos e geralmente bem arredondados. A principal característica destes arenitos é a ausência de variação litológica. Formam uma monótona sucessão de corpos nos quais persistem, de modo geral, as mesmas propriedades texturais, estruturais e mineralógicas. Constituem, assim, um empilhamento de cunhas arenosas que apresentam prolongamento maior na direção do vento (IBGE, 1986).

2.4.2 Características gerais do solo residual de arenito Botucatu

Autores como Thevanayagam e Mohan (2000), Pitman *et al.* (1994) e Georgiannou (1988) *apud* Rollo (2003) verificaram que, materiais que possuem matriz granular com um teor de finos elevado podem ter seu comportamento comandado pela fração fina. Materiais com um teor de finos entre 20% e 30% normalmente apresentam um comportamento transitório. Rollo (2003) estudou o comportamento geotécnico de um solo arenoso com mistura de argila. O teor de argila de 15% foi considerado ideal por aumentar a fragilidade do solo, que era um dos seus objetivos, mas também por preservar uma condutividade hidráulica satisfatória na mistura, pois teores de argila mais elevados ocasionavam um decréscimo de condutividade hidráulica o que, conseqüentemente, aumentaria os tempos de ensaio. O autor também salientou que esta mistura possuía características adequadas para a moldagem de corpos de prova para a realização de ensaios *hollow cylinder*. A distribuição granulométrica apresentada pelo solo residual de arenito Botucatu estudado no trabalho de Martins (2001)

possui um teor de finos elevado (fração silte + argila). Segundo definição da autora, o solo residual de arenito Botucatu pode ser caracterizado como um solo granular, com finos plásticos e fracamente estruturado. É possível supor que a presença de cerca de 30% de finos neste solo resulte não apenas no preenchimento dos vazios entre os grãos, mas na modificação dos contatos granulares. Desta forma, os finos recobrem os grãos, preenchem as irregularidades superficiais e aumentam a área de contato. Como consequência, promovem a redistribuição de tensões no interior do solo com redução nas tensões de contato entre grãos. Desta forma, níveis de tensões necessários para promover em areias limpas o esmagamento dos grãos de quartzo em compressão (≈ 10 MPa), não são suficientes para gerar o esmagamento de grãos de quartzo nos solos de granulometria mista. A compressibilidade é claramente afetada pela presença de finos e deformações plásticas consideráveis são notadas no primeiro carregamento. A plasticidade dos finos e a mineralogia dos grãos de areia parecem ser fatores relevantes neste comportamento (Martins, 2001). A autora realizou uma série de ensaios triaxiais em corpos de prova indeformados (naturalmente cimentados) e corpos de prova artificialmente cimentados, e concluiu que a cimentação entre as partículas deste solo comanda sua resistência ao cisalhamento, principalmente para baixos níveis de tensão. Ferreira (1998) também realizou ensaios triaxiais em um solo residual de arenito Botucatu e no trabalho de Martins *et al.* (1998), seus resultados são comparados com os que foram apresentados posteriormente em Martins (2001). Foi observado que as superfícies de plastificação devidas à estrutura observadas para estes solos são coincidentes, mas os parâmetros de resistência ao cisalhamento diferem. Segundo Ferreira (1998), fica claro, na comparação destes resultados, que os dois materiais apresentam uma componente estrutural em comum, provavelmente associada à cimentação, que sofre uma plastificação a baixos níveis de deformação axial. O solo residual de arenito Botucatu utilizado por Martins (2001) foi obtido em uma jazida no município de São Leopoldo, na região metropolitana de Porto Alegre e o solo utilizado por Ferreira (1998) é de uma jazida localizada na rodovia estadual RS-239. Martins (2001) também realizou um minucioso estudo para identificar as feições mineralógicas deste solo; seus resultados são apresentados com maiores detalhes no item 2.4.3.

Martins (2001) observou que, quando submerso sem confinamento, o solo residual de arenito Botucatu se desintegra completamente, porém, na umidade natural apresenta alguma estabilidade ao manuseio. A resistência à compressão simples determinada por em laboratório por esta autora foi baixa para amostras indeformadas na umidade natural de campo. Segundo

Dobereiner e De Freitas (1986) arenitos com resistência à compressão simples inferior a 0,5 MPa se desintegram quando submetidos à saturação na condição não confinada, caracterizando o limite entre solo e rocha branda. Núñez (1991) também realizou ensaios para determinar a resistência à compressão simples, porém em amostras remoldadas, nas energias de compactação normal e intermediária. Na Tabela 2.1 são apresentados estes resultados, onde pode ser observado que a resistência à compressão simples (RCS) encontrada por Martins (2001) em amostras indeformadas na umidade natural de campo, é praticamente a mesma encontrada por Núñez (1991) em corpos de prova moldados com os parâmetros de compactação da energia normal.

Núñez (1991) estudou a estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu visando seu emprego na pavimentação. Foram apontados vários fatores que limitam o emprego deste solo em camadas de sub-base. A Tabela 2.2 apresenta um resumo dos valores das propriedades mecânicas relevantes à pavimentação deste solo residual, determinadas pelo autor. Com o objetivo de melhorar as propriedades deste material, foi realizada a estabilização físico-química do mesmo, através da dosagem solo-cal e solo-cimento. Segundo análise estrutural realizada pelo autor, misturas compactadas de solo + 9% de cal ou de solo + 11% de cimento, podem ser empregadas como camada de base, e misturas do solo + 5% de cal podem constituir camadas de sub-base de pavimentos com intenso volume de tráfego. O solo utilizado por Núñez (1991) se origina da mesma jazida que o solo estudado por Martins (2001).

Tabela 2.1 – Resistência à compressão simples do solo residual de arenito Botucatu, determinada por Martins (2001) e Núñez (1991).

Referência	γ_d (kN/m ³)	w(%)	RCS (MPa)	Características do CP
Martins (2001)	15,3 – 16,5	13,0 - 16,5	0,18 - 0,20	Amostra indeformada na umidade natural
Núñez (1991)	17,4	15,9	0,19	Amostra remoldada na energia de compactação normal
	18,9	13,3	0,47	Amostra remoldada na energia de compactação intermediária

Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas de um solo residual de arenito Botucatu, relevantes à pavimentação (Núñez, 1991).

Ensaio	Parâmetro	Energia de compactação	
		Normal	Intermediária
Compactação	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	17,40	18,90
	$w_{\acute{o}t}$ (%)	15,90	13,30
Índice suporte Califórnia	ISC _{máx} (%)	9,0	19,0
	$w_{ISC\acute{m}áx}$ (%)	14,40	11,50
	ISC _{wot} (%)	7,90	11,50
Resistência à compressão simples	RCS (kPa)	190	470
Módulo de resiliência ($MR = k_1\sigma_3^{k_2}$)	K_1	25308	43348
	K_2	0,34	0,26

2.4.3 Mineralogia e microestrutura do solo residual de arenito Botucatu

Uma amostra deste solo foi submetida por Núñez (1991) ao ensaio expedito apresentado por Ingles e Metcalf (1972), denominado *Emerson Crumb Test*. Este ensaio consiste em observar o comportamento de um “torrão” de solo indeformado, ao ser imerso em um copo de água. Conforme o processo de desintegração ou dispersão observado, a ocorrência de determinados tipos de argilominerais pode ser arbitrada. Segundo a observação do autor, este ensaio apontou a predominância de caulinita na amostra. De acordo com este ensaio expedito, a presença de caulinita é detectada pela ocorrência da seguinte seqüência de fatos: (i) após imersão do “torrão” de solo em água a amostra se desintegrou, mas não se dispersou; (ii) uma nova amostra é umedecida antes da imersão e novamente não ocorreu dispersão; (iii) a existência de carbonatos não é identificada na amostra (não ocorre efervescência após pingar uma gota de ácido); e por fim (iv) após vibrar vigorosamente o copo de água com a amostra, também não ocorreu dispersão. Assim, se pode concluir que o argilomineral predominante é a caulinita (Ingles e Metcalf, 1972).

Martins (2001) realizou uma detalhada investigação em nível microscópico no solo residual de arenito Botucatu. Com base nos seus resultados de microscopia ótica, a autora

conclui que o solo residual de arenito Botucatu da Vila Scharlau apresenta, de forma geral: (i) textura clástica remanescente, bimodal e porosa; (ii) contatos entre grãos do tipo longo a pontual; (iii) grãos com incipiente orientação paralela à estratificação; (iv) pigmentação por óxido de ferro; (v) forma dos grãos subarredondada a arredondada; (vi) matriz secundária porosa composta por argilominerais neoformados do tipo caulinita. Martins (2001) também realizou uma contagem modal, a fim de estimar os percentuais relativos a cada tipo de mineral presente neste solo. Estes resultados são apresentados na Tabela 2.3. A Figura 2.35 apresenta uma fotomicrografia de uma amostra de solo, obtida por Martins (2001), através da passagem de luz natural em uma lâmina impregnada com corante. Nesta figura, pode ser observada uma visão geral da microestrutura natural do solo residual de arenito Botucatu. Através de imagens obtidas em um MEV (microscópio eletrônico de varredura) a autora observou a microestrutura do solo indeformado e reconstituído, (Figuras 2.36 e 2.37 respectivamente). A primeira figura apresenta uma imagem dos grãos de quartzo em uma matriz caulínica. A ligação entre grãos é formada pela cimentação por óxido de ferro, que recobre tanto os grãos de quartzo como os argilominerais adjacentes, formando pontes de ligação. Na segunda imagem, que corresponde ao material reconstituído, ocorre uma quebra desta ligação e os grãos de quartzo se dispõem de maneira desorganizada, recobertos pelas partículas de argila e óxidos (Martins, 2001).

Através de resultados de difratogrametria de raios-X, Núñez (1991) realizou uma análise semiquantitativa da fração argila, e identificou na porção cristalina do solo residual de arenito Botucatu, as seguintes porcentagens: 9,2% de caolinita, 3,2% de hematita, 2,1% de micas e ilita; e 1,2% de quartzo. Também foi realizada uma análise química, pelo método de ataque sulfúrico na fração argila, com o objetivo de obter as porcentagens de sílica (SiO_2), Alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), que foram iguais a 9,70%, 6,69% e 1,21%, respectivamente.

Tabela 2.3 - Composição modal do solo residual de arenito Botucatu (Martins, 2001).

Mineral	(%)
Quartzo monocristalino	29,8
Quartzo policristalino	12,8
Matriz secundária porosa (poros + argilominerais)	29,5
Lutitos (lamitos, siltitos)	7,3
Opacos e turmalinas	3,5
Óxidos	9,9
Metamórficas/micas/xistos	7,2

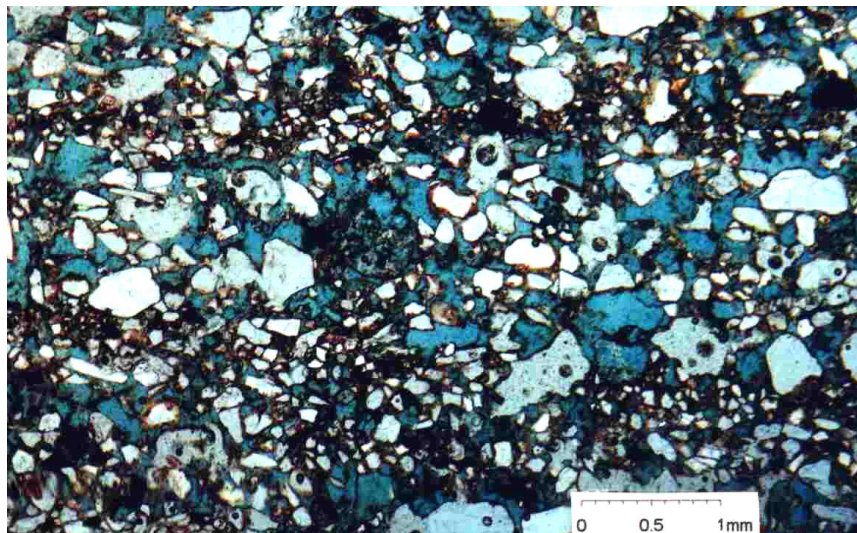


Figura 2.35 - Arranjo de grãos do solo residual de arenito Botucatu: textura clástica com concentração de óxido de ferro nas bandas de granulometria fina (Martins, 2001).

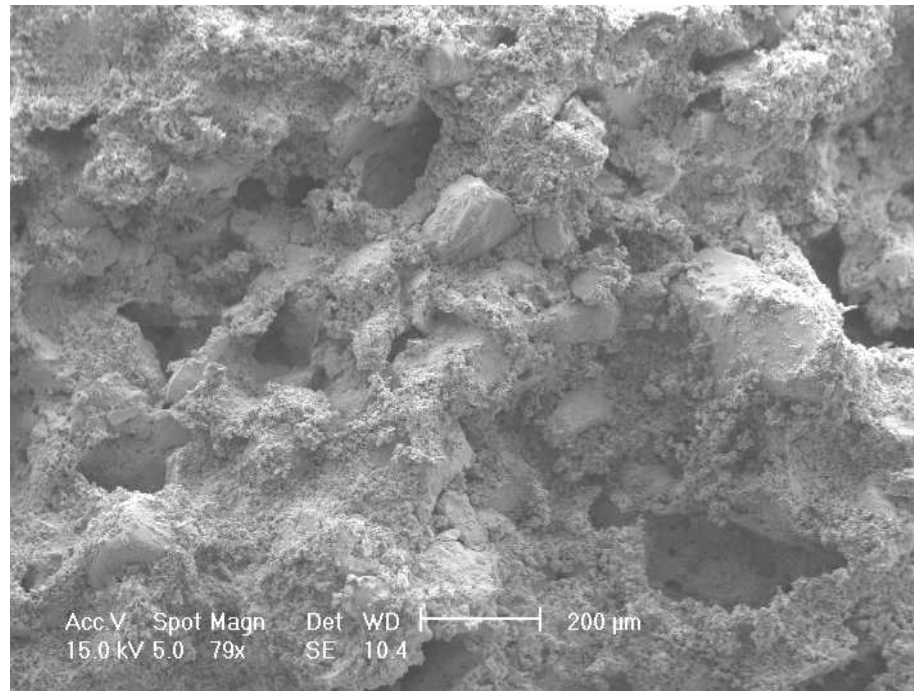


Figura 2.36- Aspecto estruturado da amostra natural do solo residual de arenito Botucatu, com grãos de quartzo encaixados na matriz caulínica (Martins, 2001).

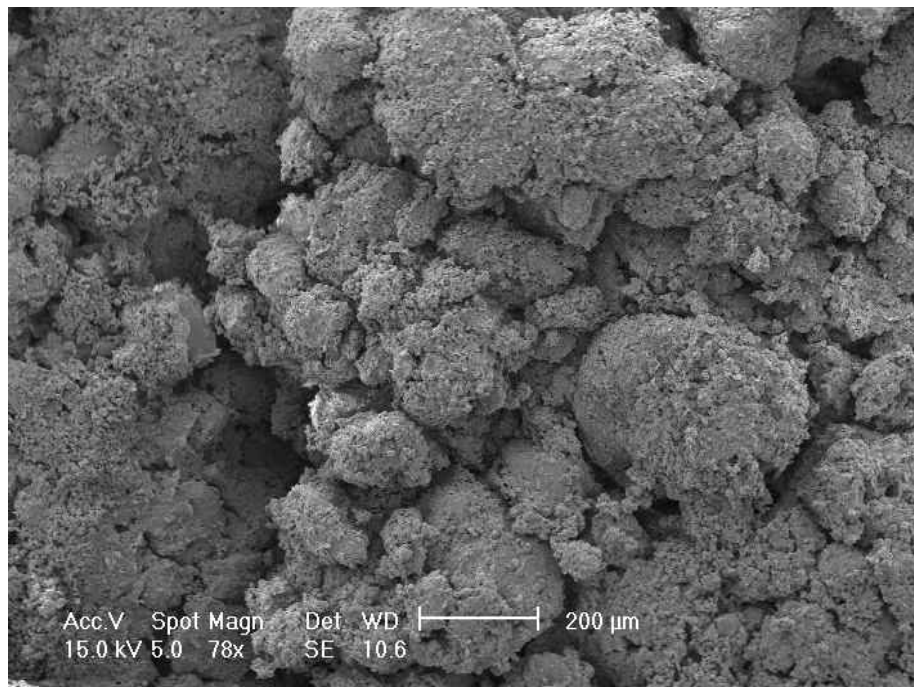


Figura 2.37 - Aspecto desorganizado da amostra reconstituída do solo residual de arenito Botucatu (Martins, 2001).

3 MONTAGEM DO EQUIPAMENTO *HOLLOW CYLINDER*

A concepção e a montagem de um equipamento *hollow cylinder* são parte desta tese. A revisão da literatura sobre o tema, apresentada no Capítulo 2, discute as principais características de diferentes tipos de equipamentos e um grande número de informações que auxiliaram no projeto do equipamento desenvolvido. Estruturalmente, foi utilizado como modelo o equipamento desenvolvido na década de 90 no *Imperial College* (Jardine, 1997 *apud* Jardine et al., 2004), apresentado no item 2.2.6. Características referentes aos sistemas de aplicação de cargas, de instrumentação e de aquisição automática de dados também são apresentadas neste capítulo.

3.1 Descrição estrutural do equipamento

Toda a estrutura do equipamento *hollow cylinder* desenvolvido nesta tese está apoiada sobre dois blocos de concreto simples, com 650 mm de altura, 220 mm de largura e 700 mm de comprimento. A Figura 3.1 mostra um desenho do *layout* geral do equipamento *hollow cylinder* com a identificação de suas principais peças, e a Figura 3.2 apresenta uma fotografia do equipamento.

A base do equipamento consiste em uma placa de liga de alumínio 5052, com 700 x 520 x 44,5 mm, fixada aos blocos de concreto por meio de chumbadores (Figura 3.3). Nesta placa estão fixados: (i) quatro barras de aço inoxidável que dão suporte à câmara triaxial; (ii) um cilindro pneumático do tipo *Bellofram*, responsável pela aplicação da carga axial e (iii) um cilindro pneumático, também do tipo *Bellofram*, mas de menor porte, cuja função é suportar a placa de alumínio intermediária (apresentada a seguir). O cilindro pneumático maior tem um diâmetro de êmbolo igual a 200 mm, e é capaz de aplicar um carregamento axial no corpo de prova de até aproximadamente 16 kN. Seu eixo de aplicação de carga está conectado ao eixo central do equipamento *hollow cylinder* por um sistema de peças que possuem duas funções: transferir o carregamento axial e evitar que a rotação que ocorre no eixo central seja transferida ao eixo do cilindro pneumático. Para esta finalidade, um rolamento com dupla carreira de esferas guia o pistão do cilindro e uma esfera de aço apoiada na sua ponta quebra o atrito. A Figura 3.4 apresenta o desenho esquemático da disposição destas peças no equipamento *hollow cylinder* e, também, a fotografia das mesmas separadamente. A Figura

3.5 apresenta um desenho com o esquema de montagem das peças componentes do cilindro pneumático que aplica o carregamento axial, e também sua fotografia.

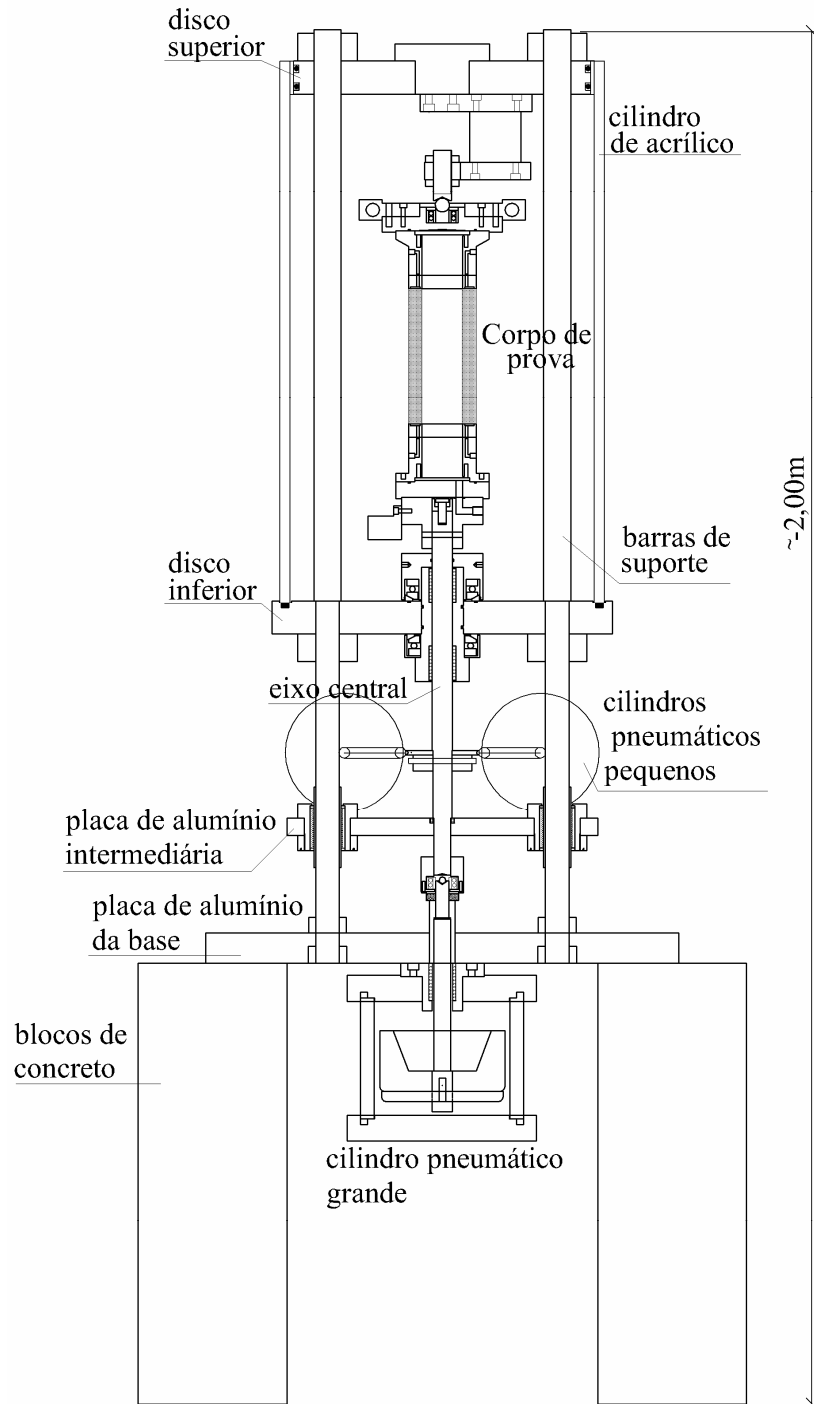
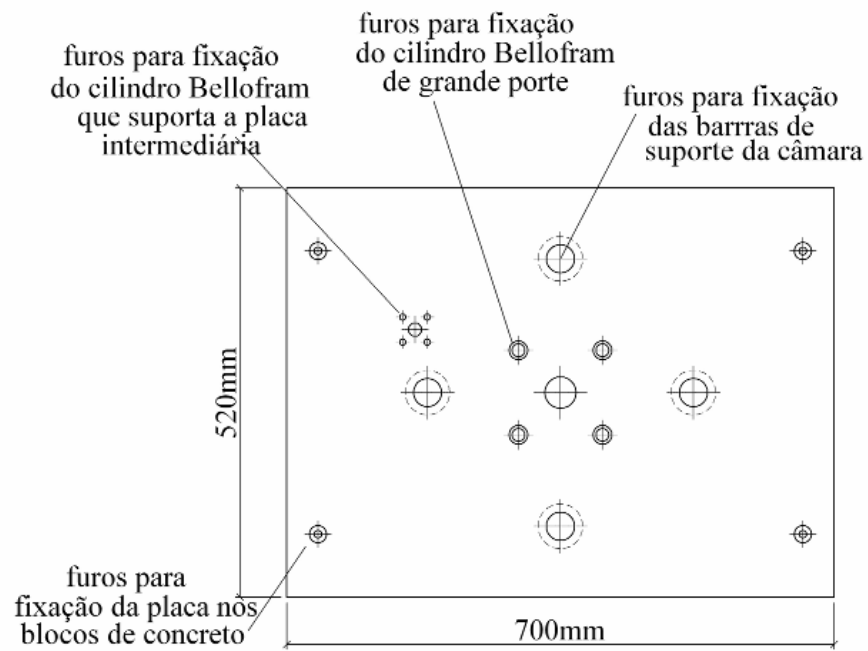


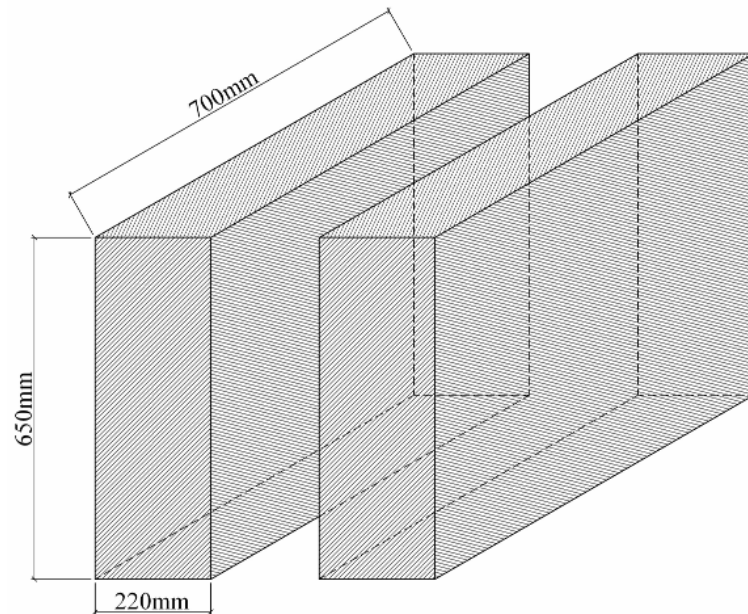
Figura 3.1 – *Layout* geral do equipamento *hollow cylinder* em corte, com a identificação de suas principais peças .



Figura 3.2 - Fotografia do layout geral do equipamento *hollow cylinder torsional* com o quadro pneumático e o sistema de aquisição automática de dados.

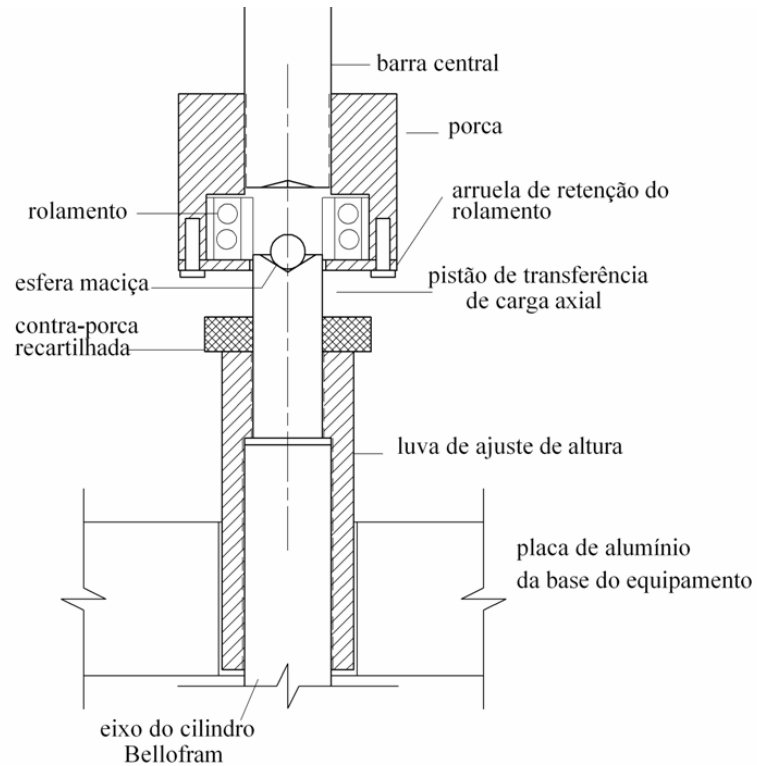


(a) Placa de alumínio da base

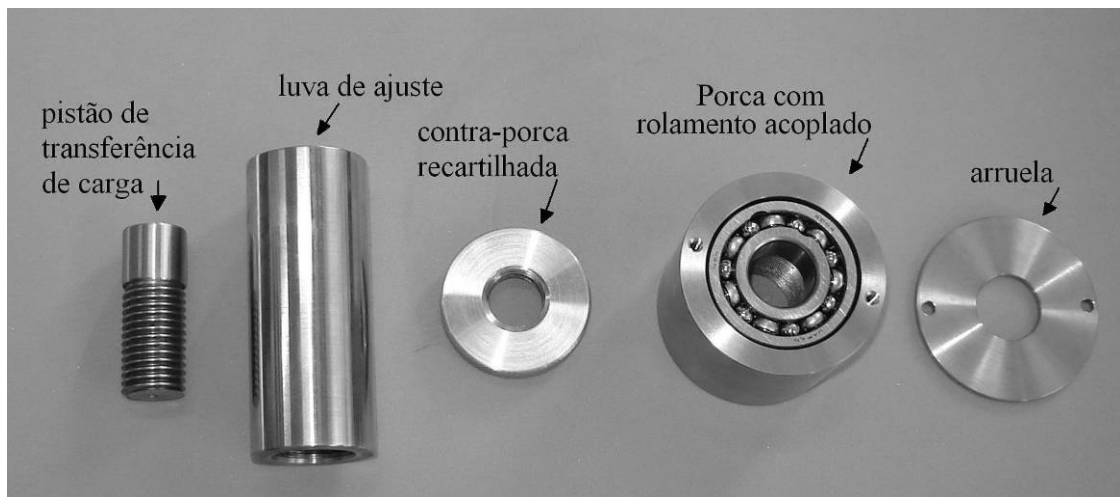


(b) Blocos de concreto

Figura 3.3 – Placa de alumínio da base do equipamento e blocos de concreto: (a) desenho esquemático e (b) fotografia da placa fixada nos blocos.

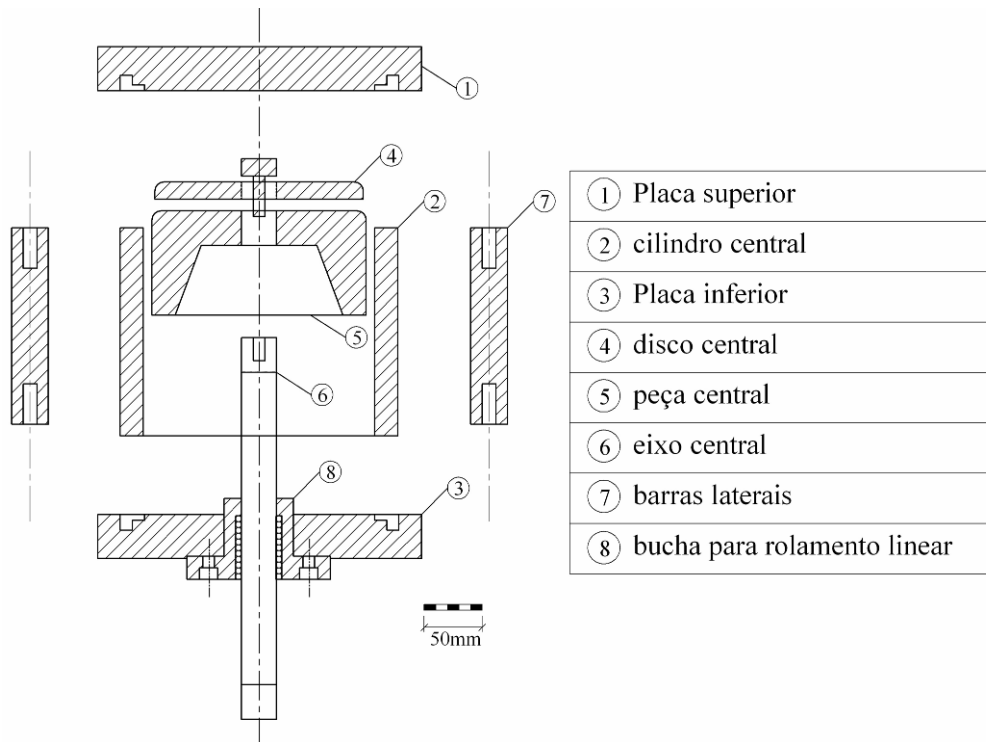


(a)

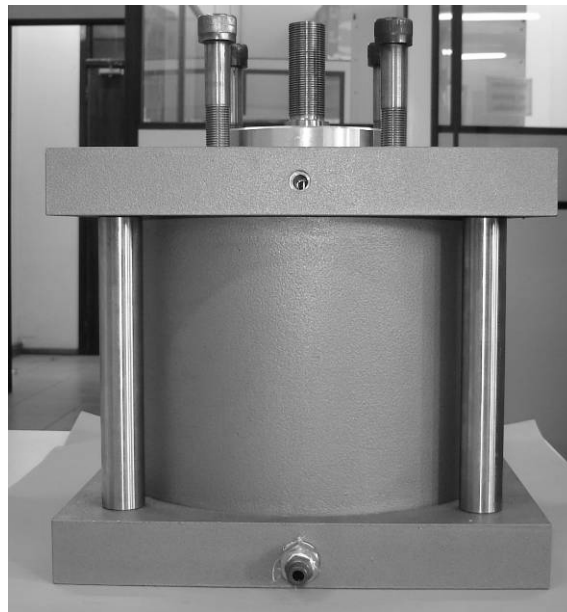


(b)

Figura 3.4 – Sistema de fixação da barra central do cilindro pneumático vertical ao eixo central do equipamento *hollow cylinder* (a) desenho esquemático da montagem das peças (b) fotografia e identificação das peças.



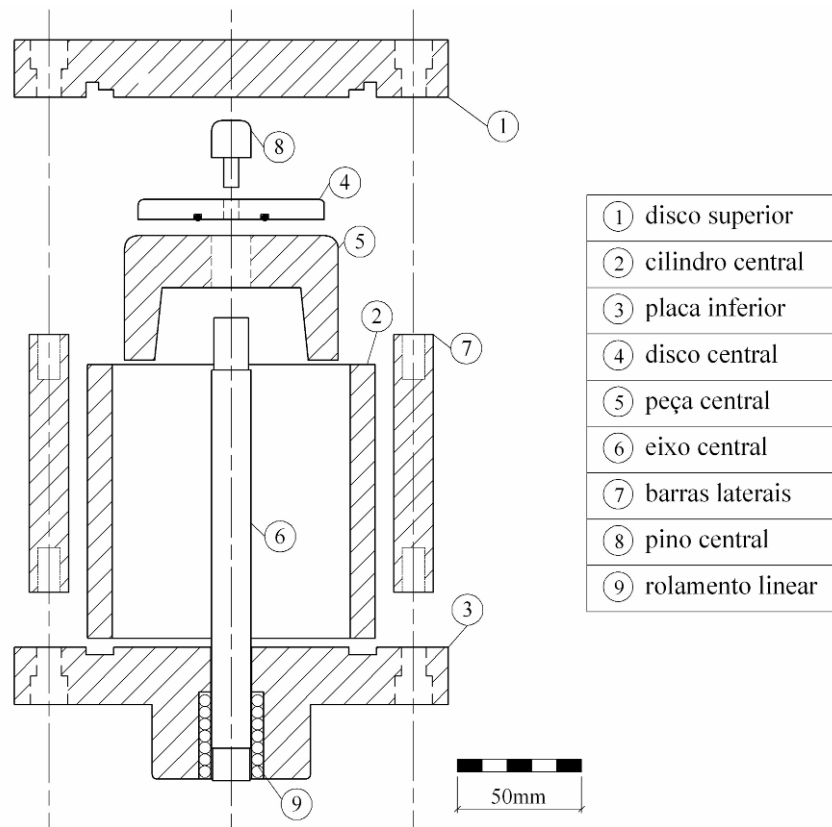
(a)



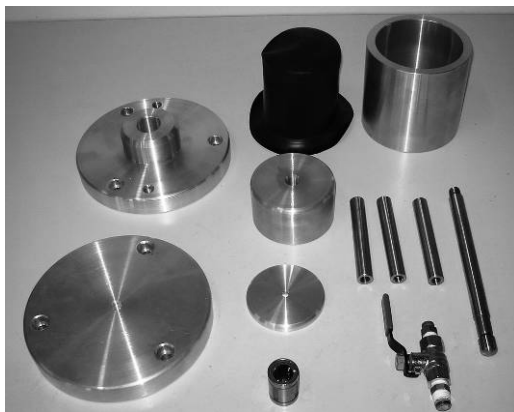
(b)

Figura 3.5 –Cilindro pneumático que aplica a carga axial: (a) desenho esquemático das peças componentes, (b) fotografia do cilindro montado e pintado.

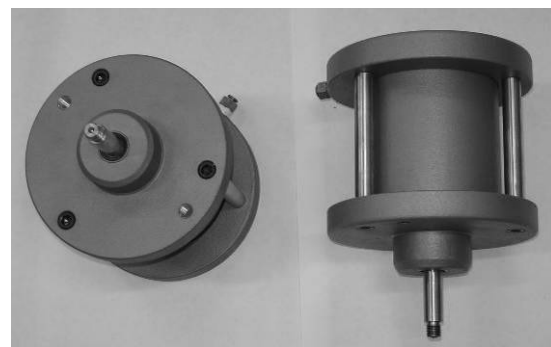
A rotação é transferida ao eixo central do equipamento *hollow cylinder* por um sistema composto por um par de cilindros pneumáticos do tipo *Bellofram* (Figura 3.6), com diâmetro de êmbolo igual a 101 mm e capacidade de carga de até aproximadamente 4 kN. Estes cilindros pneumáticos atuam em sentidos opostos, e seus eixos de aplicação de carga são conectados por uma correia que faz girar uma roda dentada concêntrica e fixa ao eixo central do equipamento. Todo o sistema de aplicação de torque está montado sobre uma placa de liga de alumínio 5052, com dimensões de 460 x 240 x 25,4 mm, denominada de “placa de alumínio intermediária”. O par de cilindros pneumáticos é fixado a esta placa por canaletas de aço e a roda dentada é fixada ao eixo central por um pino elástico. No centro da placa de alumínio, um rolamento é responsável por minimizar o atrito entre a placa e o eixo central. A Figura 3.7 apresenta um desenho esquemático e a fotografia deste sistema montado no equipamento. A Figura 3.8 mostra separadamente as peças que compõem este sistema. O peso desta placa de alumínio, bem como o peso de todas as peças montadas sobre a mesma, é suportado por outro cilindro pneumático que está fixado na placa de alumínio da base do equipamento *hollow cylinder*. À medida que a carga vertical é aplicada através do cilindro pneumático de maior porte na base do equipamento, o eixo central ligado à base do corpo de prova se desloca pra cima. Todo o sistema de torque fixo na placa de alumínio intermediária também sobe. Rolamentos lineares embutidos em suportes de aço (Figura 3.9) guiam esta placa por duas das barras de suporte do equipamento *hollow cylinder* e asseguram que não ocorra atrito significativo com o seu deslocamento. O sistema responsável pela aplicação do torque ao corpo de prova foi desenvolvido com base no sistema apresentado por Hight *et al.* (1983) e Jardine (1997) *apud* Jardine *et al.*, 2004.



(a)

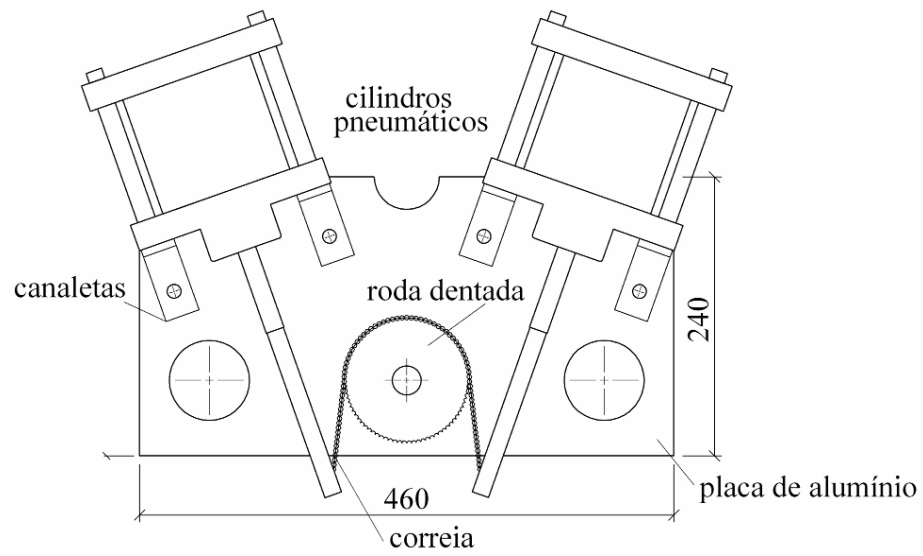


(c)

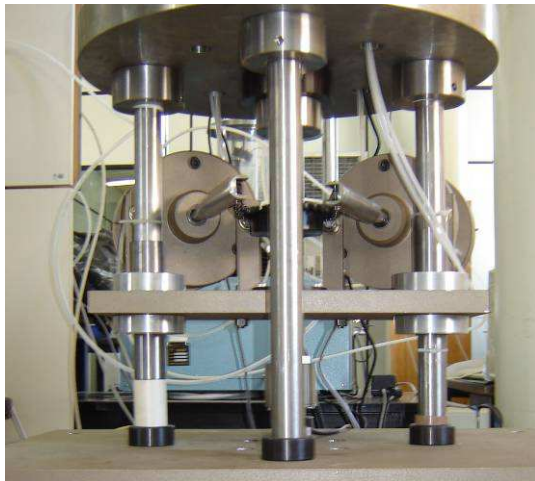


(b)

Figura 3.6 – Cilindros pneumáticos que aplicam o torque: (a) desenho esquemático das peças componentes, (b) fotografia das peças e (c) fotografia dos cilindros montados e pintados.

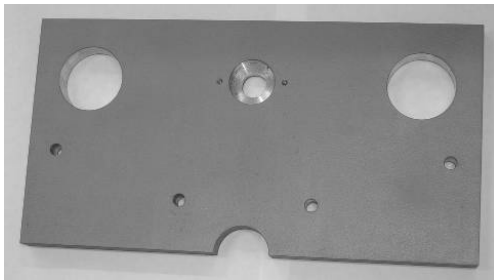


(a)

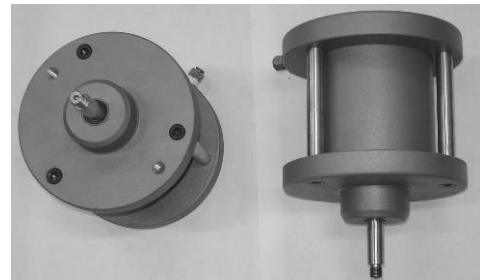


(b)

Figura 3.7 – Sistema de aplicação de torque: (a) desenho esquemático (medidas em mm), (b) fotografias.



Placa de alumínio intermediária



Cilindros pneumáticos



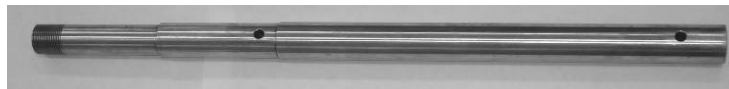
Canaletas de fixação dos cilindros pneumáticos



Roda dentada e correia

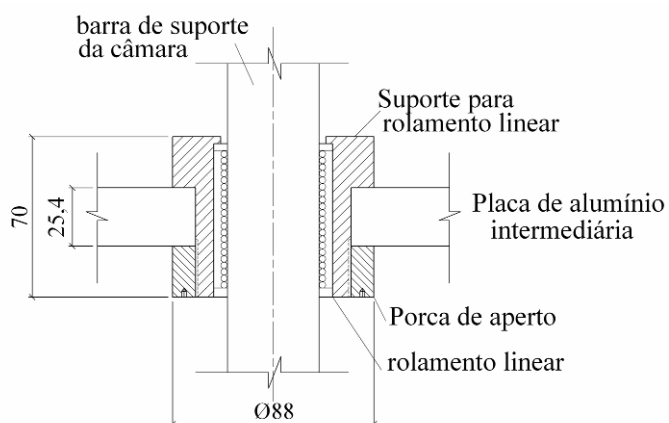


Prolongamentos dos eixos dos cilindros para fixação da correia



Eixo central

Figura 3.8 – Fotografias e identificação das peças que compõem o sistema de aplicação de torque.



(a)



(b)

Figura 3.9 – Suportes que acoplam os rolamentos lineares na placa de alumínio intermediária: (a) desenho esquemático (medidas em mm) e (b) fotografia.

As quatro barras de aço inoxidável que guiam a placa de alumínio intermediária e suportam a estrutura da câmara triaxial de ensaio têm diâmetro variável (35 a 40 mm). A base da câmara é composta por uma placa circular de aço inox (Figura 3.10) com 504 mm de diâmetro e 49,5 mm de espessura, que apóia o tubo de acrílico da câmara. No centro desta placa é fixada uma bucha de aço inoxidável onde está acoplado um conjunto de rolamentos lineares e axiais, que têm a função de reduzir ao máximo a ocorrência de atrito no deslocamento axial e na rotação do eixo central do equipamento *hollow cylinder*. Anéis *O-ring* garantem a vedação do sistema. A Figura 3.11 mostra o desenho esquemático das peças que acoplam estes rolamentos e também suas principais características.

O tubo de acrílico, com diâmetro interno de 450 mm, altura de 800 mm e espessura de parede de 15 mm, promove o confinamento da câmara triaxial do equipamento. Tiras de reforço foram confeccionadas diretamente sobre o acrílico para que este suportasse pressões internas elevadas. Este reforço é formado por anéis de fibra de vidro com largura de 80 mm e espessura adicional de 15 mm. A Figura 3.12 apresenta a fotografia do tubo de acrílico reforçado com fibra de vidro e também um desenho com as suas dimensões, bem como o espaçamento e a disposição dos anéis. Quando não está acoplado à câmara, este tubo permanece suspenso sobre o equipamento, suportado por uma talha com acionamento manual da marca *Koch*, com capacidade de 5 kN. Esta mesma talha foi utilizada durante a montagem do equipamento.

No topo da câmara triaxial existe outra placa circular de aço inoxidável com diâmetro de 439 mm e espessura de 49,5 mm. Esta placa é fixada nas barras de suporte e fica por dentro do tubo de acrílico, quando a câmara está montada. Dois anéis *O-ring* instalados na superfície lateral da placa garantem a vedação da câmara. Quatro placas de aço comum (165 x 125 x 32 mm), aparafusadas na superfície da placa circular superior, apóiam-se sobre a parede do tubo de acrílico, promovendo o aperto deste tubo contra a placa circular inferior, garantindo assim a eficiente vedação da câmara quando a pressão de confinamento é aplicada. No centro da placa circular superior há uma tampa, que possui a função de fixar a instrumentação interna à câmara triaxial. A Figura 3.13 mostra o desenho esquemático da placa circular superior instalada na câmara e a fotografia das peças separadamente.

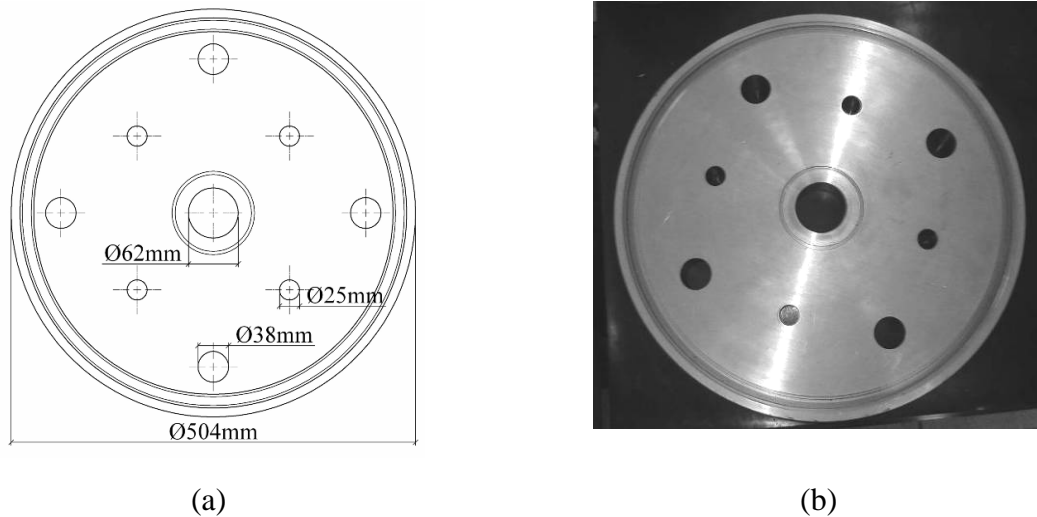


Figura 3.10 - Vista superior da placa inferior de aço inoxidável da câmara triaxial do equipamento *hollow cylinder*: (a) desenho esquemático e (b) fotografia da peça.

Dentro da câmara triaxial, um conjunto de peças, situadas abaixo e acima do corpo de prova, possui diferentes funções na montagem do ensaio *hollow cylinder*. A Figura 3.14 mostra o desenho em corte da estrutura interna à câmara triaxial, com a identificação destas peças e seu *layout* de montagem. A seguir cada peça é apresentada:

- a) A base do pedestal do corpo de prova, apresentada em detalhe na Figura 3.15, foi confeccionada em aço inoxidável e possui três funções: (i) transferir a carga axial e o torque ao corpo de prova; (ii) transferir pressão interna ao corpo de prova; e (iii) fixar a placa de reação do transdutor de deslocamento horizontal que vai medir o deslocamento radial da base do corpo de prova. Esta base do pedestal é fixada ao eixo central do equipamento *hollow cylinder* por meio de um parafuso e um pino elástico.
- b) Sobre a base há uma peça de aço inoxidável intermediária, cuja função é de conectar a base ao pedestal do corpo de prova por meio de parafusos e pinos elásticos (Figura 3.16).
- c) O pedestal do corpo de prova possui dois canais de drenagem, que estão ligados à base do corpo de prova, e sua parte interna possui uma ranhura para fixação da membrana interna ao corpo de prova. Esta peça foi usinada em aço inoxidável e é apresentada em detalhes na Figura 3.17.

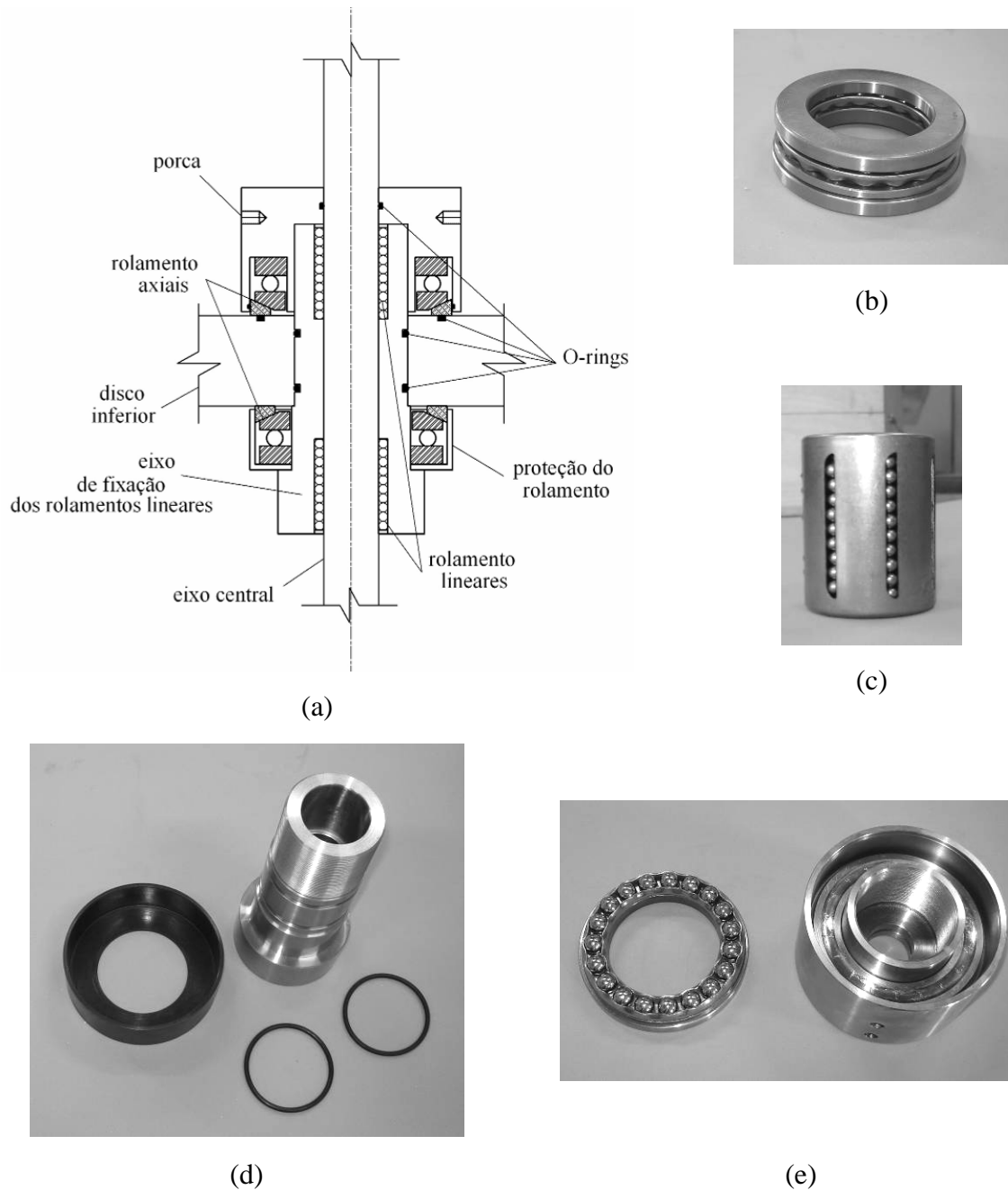
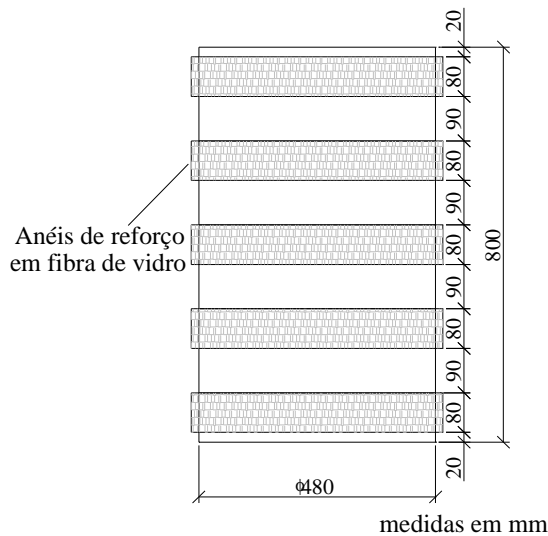


Figura 3.11 – Rolamentos lineares e axiais para minimizar o atrito no eixo central: (a) desenho esquemático em corte, com a localização e identificação das peças, (b) fotografia de um dos rolamentos axiais, (c) fotografia de um dos rolamentos lineares, (d) fotografia dos anéis *O-ring*, do eixo de fixação dos rolamentos lineares e da peça de proteção do rolamento axial inferior e (e) porca com rolamento axial superior.



(a)



(b)

Figura 3.12 – Tubo de acrílico com anéis de reforço em fibra de vidro do equipamento *hollow cylinder*: (a) desenho esquemático e (b) fotografia.

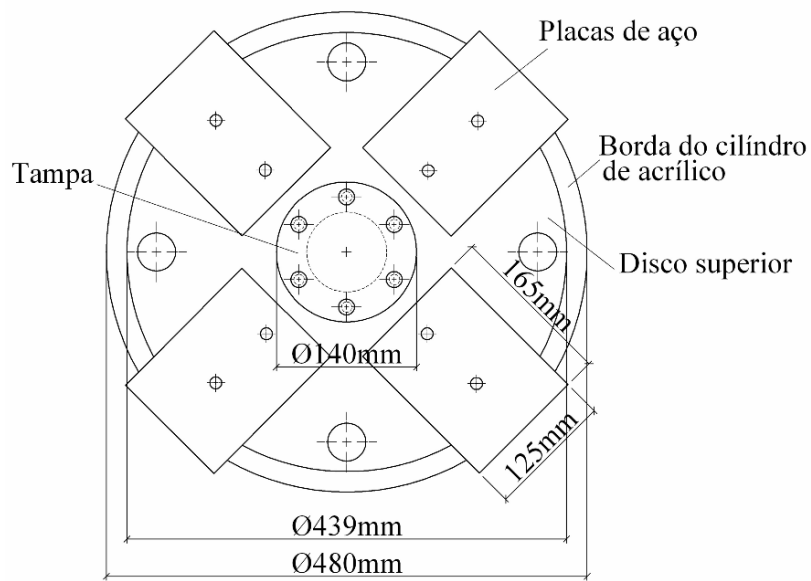
- d) A base e o topo do corpo de prova são peças idênticas e foram usinadas em aço comum que recebeu um tratamento anti-oxidação. Cada peça possui seis palhetas com 4 mm de espessura e 10,5 mm de altura, que cravam no corpo de prova para evitar que este deslize no contato com as suas extremidades, garantido assim que o torque seja efetivamente transferido. Além das palhetas, estas peças também possuem seis rebaixos circulares, onde são encaixadas pequenas pedras porosas que garantem a drenagem do corpo de prova. A Figura 3.18 apresenta seu desenho esquemático e fotografia.
- e) O cabeçote do corpo de prova é uma peça similar ao pedestal, porém foi confeccionado em alumínio (Figura 3.19). Na sua parte interna há uma ranhura para fixação da membrana interna ao corpo de prova e também existem dois canais de drenagem ligados ao corpo de prova.
- f) O cabeçote de transferência de carga, também em alumínio, é fixado ao cabeçote do corpo de prova. Esta peça tem a função de promover a reação entre todo o conjunto de peças que estão sobre o corpo de prova e uma célula de carga que é fixada no topo da câmara triaxial, medindo assim o carregamento vertical aplicado no corpo de prova. Nesta peça também é fixada a viga de torque, apresentada a seguir. No centro desta peça

há um rolamento de dupla carreira de esferas e uma esfera de alumínio, que possuem a função de minimizar o atrito com o pistão de carga axial, quando o torque for aplicado no corpo de prova. Na Figura 3.14 pode ser observada a disposição destas peças na câmara triaxial e a Figura 3.20 apresenta o cabeçote de transferência de carga.

g) Sobre o cabeçote de transferência de carga é fixada a viga de torque. Em suas extremidades são acoplados pistões em alumínio, denominados pistões de torque, que irão reagir contra placas de aço inoxidável, que são fixadas em duas células de cargas instaladas nas barras de suporte da câmara. Assim, se obtém a medida do torque aplicado no corpo de prova. A Figura 3.21 mostra um desenho esquemático com a vista superior da montagem destas peças. A Figura 3.22 apresenta o desenho em corte da viga e sua fotografia com os pistões de torque acoplados. A Figura 3.23 mostra uma foto da viga de torque fixada no cabeçote de transferência de carga. No centro deste conjunto está o rolamento de dupla carreira de esferas. Nesta figura pode ser observado que a fixação de ambas as peças é feita por meio de parafusos e pinos elásticos, garantindo assim uma completa união do conjunto.

Para a montagem preliminar do equipamento *hollow cylinder* e a realização de testes na instrumentação, foi confeccionado um corpo de prova teste em nylon (Figura 3.24) com as mesmas dimensões adotadas para o corpo de prova em solo: altura de 200mm, diâmetro externo de 100mm e diâmetro interno de 60mm.

O Anexo A desta tese apresenta todas as pranchas de usinagem das peças que compõem o equipamento *hollow cylinder torsional*, com seus respectivos cortes, medidas e detalhes.



(a)



Placa circular superior em aço
inoxidável



Tampa do disco



Placas de aço

(b)

Figura 3.13 – Placa circular superior de aço inoxidável e peças complementares: (a) desenho esquemático na câmara triaxial (vista superior) e (b) fotografia das peças.

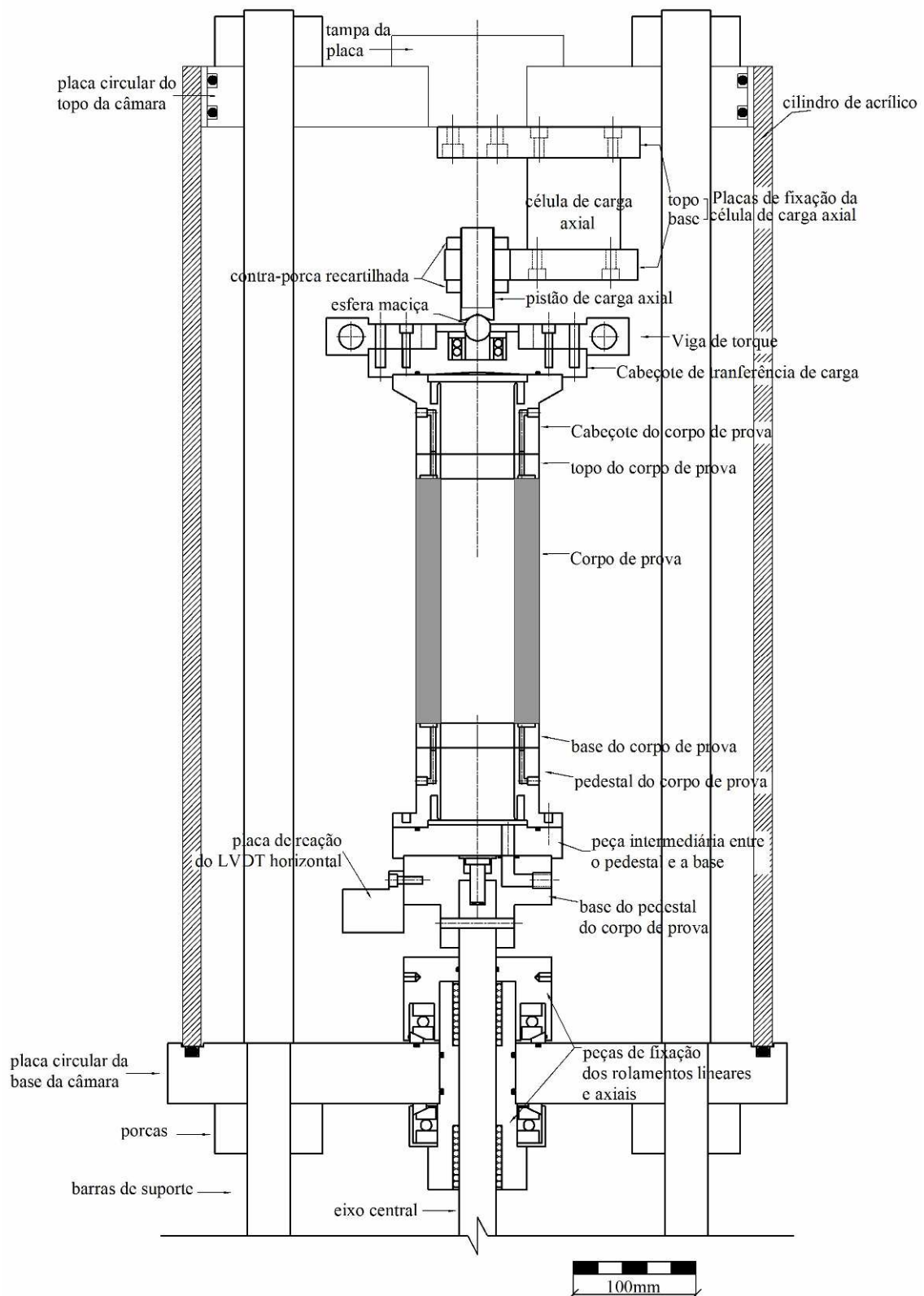
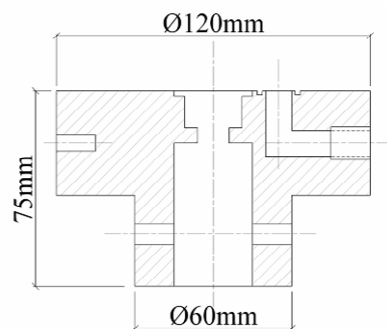


Figura 3.14 – Corte esquemático das peças internas à câmara triaxial, com esquema de montagem.



(a) desenho - corte

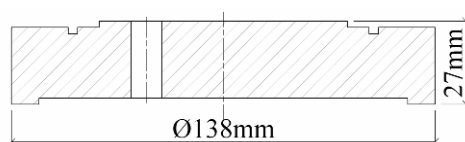


(b) fotografia - topo



(c) fotografia - base

Figura 3.15 – Base do pedestal do corpo de prova: (a) desenho em corte, (b) fotografia – vista do topo e (c) fotografia – vista da base.



(a) desenho – corte

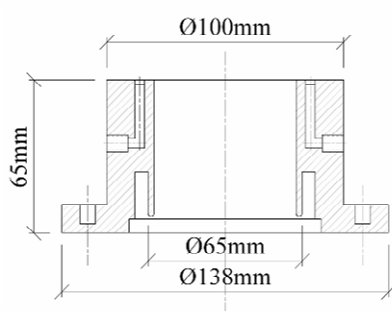


(b) fotografia – topo



(c) fotografia – base

Figura 3.16 – Peça intermediária entre a base e o pedestal do corpo de prova: (a) desenho em corte, (b) fotografia – vista do topo e (c) fotografia – vista da base.



(a) desenho - corte

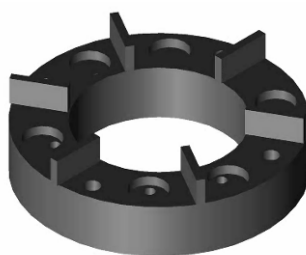


(b) fotografia - topo



(c) fotografia - base

Figura 3.17 – Pedestal do corpo de prova: (a) desenho em corte, (b) fotografia – vista do topo e (c) fotografia – vista da base.



(a) desenho - perspectiva

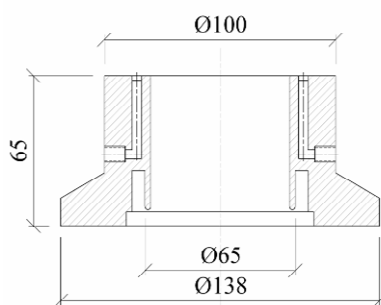


(b) fotografia – topo e base



(c) fotografia - lateral

Figura 3.18 – Base e topo do corpo de prova: (a) desenho em perspectiva, (b) fotografia – vista do topo e da base (c) fotografia – vista lateral.



(a) desenho - corte

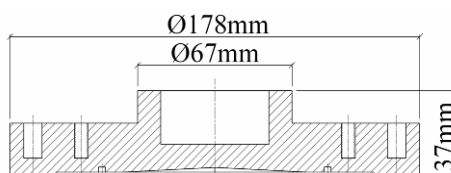


(b) fotografia - topo



(c) fotografia - base

Figura 3.19 – Cabeçote do corpo de prova: (a) desenho em corte e (b) fotografia – vista do topo e (c) fotografia – vista da base.



(a) desenho - corte



(b) fotografia - topo



(c) fotografia - base

Figura 3.20 - Cabeçote de transferência de carga: (a) desenho em corte e (b) fotografia – vista do topo e (c) fotografia – vista da base.

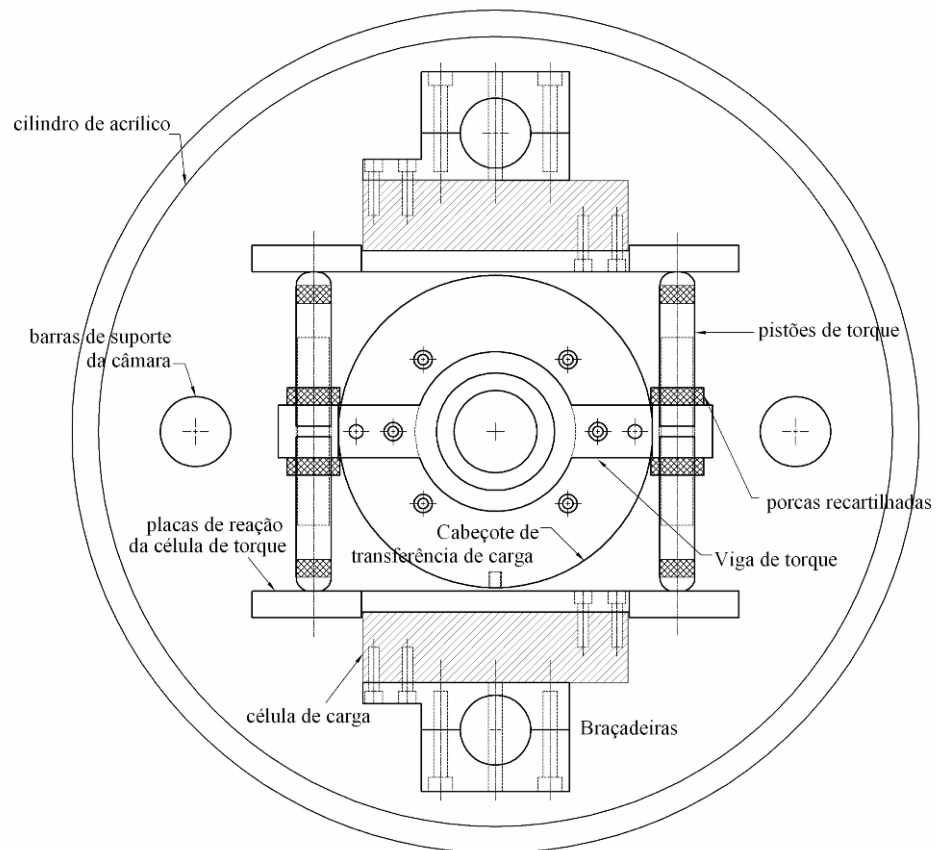
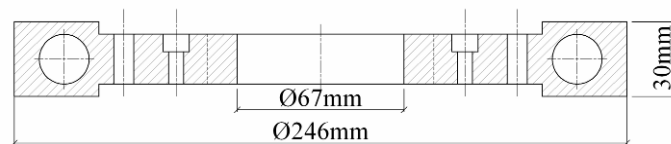


Figura 3.21 - Desenho esquemático (vista superior) com identificação das peças do sistema de medição de torque.



(a) desenho - corte



(b) fotografia - topo

Figura 3.22 – Viga de torque: (a) desenho em corte e (b) fotografia – vista do topo, com os pistões de torque acoplados.



Figura 3.23 – Viga de torque fixada ao cabeçote de transferência de carga. No centro é acoplado o rolamento de dupla carreira de esferas.



(a)



(b)

Figura 3.24 – Corpo de prova teste confeccionado em nylon – (a) desenho esquemático, (b) fotografia.

3.2 Sistema de aplicação de pressões

A aplicação das pressões de confinamento, do carregamento axial e do torque no corpo de prova do ensaio *hollow cylinder* é realizada por um sistema pneumático, de controle manual. O sistema possibilita a aplicação de carregamento axial estático e cíclico. O carregamento cíclico é aplicado em uma seqüência de pulsos de forma aproximadamente semi-senoidal, com um período de 1 segundo, e duração do carregamento de 0,1 segundo. A seguir são apresentados os elementos que compõem o sistema pneumático:

a) Compressor de ar:

Um compressor de ar do tipo parafuso rotativo (marca *Kaeser* modelo SX-7), cujas características operacionais são apresentadas no Quadro 3.1, foi utilizado para geração de ar comprimido. Devido ao elevado fluxo de ar comprimido necessário para os ensaios com carregamento cíclico, foi adaptado ao sistema um reservatório de ar, com capacidade de 360 litros, com o objetivo de melhorar o desempenho do compressor. O reservatório, de marca *Chiaperini*, tem capacidade para 1200 kPa de pressão. O compressor *Kaeser* SX-7 e o reservatório são apresentados nas Figuras 3.25(a) e 3.25(b), respectivamente.

b) Cilindros pneumáticos:

Quatro cilindros pneumáticos fazem parte do sistema: (i) um cilindro pneumático com capacidade para 16 kN foi instalado na base do equipamento para aplicação do carregamento axial no corpo de prova; (ii) dois cilindros de menor porte, com capacidade de carga de 4 kN, transferem torque ao eixo central do equipamento por uma correia conectada a uma roda dentada; e (iii) um pequeno cilindro foi instalado sob o sistema de aplicação de torque, cuja função é suportar o peso da placa de alumínio da base do referido sistema. As dimensões e demais características dos cilindros pneumáticos são apresentadas em detalhes no item 3.1.

c) Reguladores de pressão de ar:

Para controlar a aplicação de pressão de ar nos cilindros pneumáticos, são utilizados dois reguladores de pressão de ar de grande vazão. As pressões de ar externa (p_e) e interna (p_i) ao corpo de prova são controladas manualmente, através de um regulador de pressão de ar comprimido de precisão. Como serão realizados ensaios onde $p_e = p_i$, ambas as pressões de ar originam-se do mesmo regulador, antes da entrada na câmara triaxial.

d) Válvulas solenóide e reguladora de vazão:

Nos ensaios com carregamento cíclico, a repetição da pressão de ar é obtida por uma válvula solenóide, de três vias, munida de solenóide de 48 VAC. A forma do pulso a ser aplicado no cilindro é ajustada com uma válvula de controle de vazão, conectada à saída da válvula solenóide. Reservatórios de ar comprimido secundários, instalados entre a válvula reguladora de pressão de ar e a válvula solenóide, conferem maior eficiência ao sistema.

e) Filtros:

Dois filtros de ar dispostos em série foram instalados no quadro pneumático, logo após a entrada de ar comprimido. O primeiro é um filtro de ar, cuja função é reter líquidos ou partículas sólidas que estejam presentes no ar comprimido oriundo do compressor. O segundo é um filtro coalescente, o qual retém partículas de óleo maiores que 0,01 μm . A combinação de ambos os filtros garante que o ar comprimido que abastece o sistema pneumático seja de alta qualidade, livre de resíduos.

f) Temporizador :

O acionamento das válvulas solenóides é realizado por um circuito temporizador que emite um pulso elétrico para a válvula solenóide. O sinal emitido é de 48 VAC, conforme especificações do solenóide utilizado. O período do pulso elétrico é de 1 s e tem duração de 0,025 s; o objetivo é atingir um pulso pneumático com duração de 0,1 s.

As capacidades, marcas e modelos dos reguladores de pressão e vazão, válvulas solenóides e filtros utilizados, são apresentados no Quadro 3.2.

Quadro 3.1 – Características do compressor de ar *Kaeser SX 7*.

Propriedade	Valor
Máxima pressão de trabalho	760 kPa
Mínima pressão de trabalho	550 kPa
Ajuste da válvula de segurança (alívio)	960 kPa
Máxima vazão de ar na máxima pressão de trabalho	30 cfm
Temperatura aproximada de operação	75 – 93 °C
Nível de ruído	68 dB(A)
Temperatura ambiente mínima	4 °C
Temperatura ambiente máxima	40 °C



Figura 3.25 – Compressor de ar *Kaeser SX 7* e reservatório *Chiaperini* de 360 l

Quadro 3.2 - Características dos reguladores de pressão e vazão, válvulas solenóide e filtros do sistema pneumático.

Peça	Finalidade	Capacidade (kPa)	Marca	Modelo
regulador de pressão de grande vazão	Regular pressão axial e torque	2070	Norgren	R17-600-RLNE
regulador de pressão de precisão	Regular pressão de confinamento	1000	Norgren	11-018-110
Válvula solenóide	Controlar a passagem de ar do carregamento cíclico	1000	Norgren	H061866
Válvula de controle de vazão	Controle do fluxo de ar do carregamento cíclico	1000	Norgren	T1000A4800
Filtros	ar coalescente	1030	Norgren	F74G-4AN-QP3
				F74C-4AN-QP0

O painel pneumático, onde são instalados alguns dos componentes descritos acima, é apresentado na Figura 3.26. A alimentação de ar comprimido é feita por um mangueira de borracha para ar comprimido de 1” de diâmetro e capacidade para 2070 kPa. Na conexão da mangueira com o painel, foi instalada uma válvula de esfera de segurança que, ao ser fechada,

cessa imediatamente a alimentação de ar comprimido ao sistema. O aplicação das pressões de ar é feita manualmente, por meio dos reguladores de pressão, porém o controle é feito visualmente, na tela do computador conectado ao sistema de aquisição dados, que será apresentado em detalhes a seguir. Na Figura 3.26 podem ser observados os manômetros, cuja função é fornecer uma leitura preliminar das pressões, já que os reguladores das pressões de ar para controle da carga axial, do torque e das pressões de confinamento são instrumentados com transmissores de pressão. Quando as pressões são aplicadas estaticamente, os manômetros correspondentes à aplicação de carregamento “axial” e “torque” são desconectados dos seus respectivos reguladores de pressão, e no seu lugar são conectadas mangueiras de polietileno que conduzem o ar comprimido diretamente aos cilindros pneumáticos.

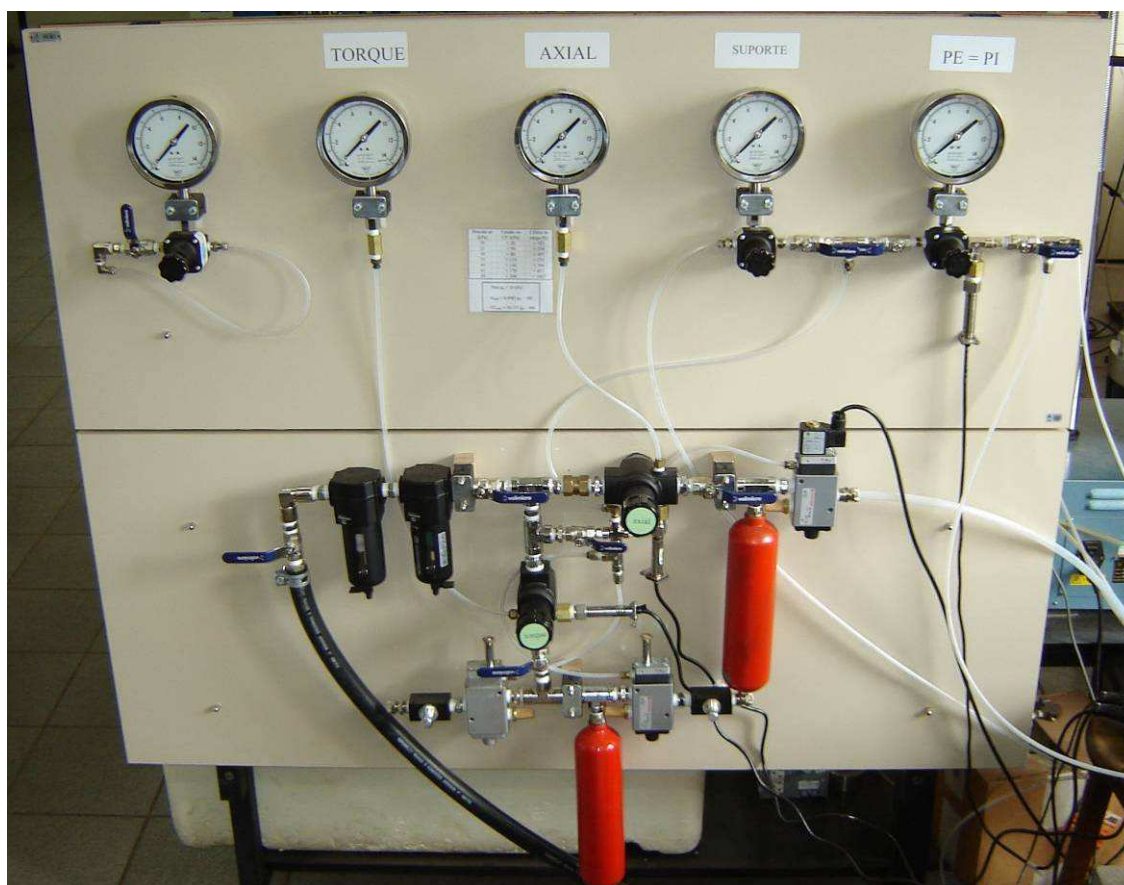


Figura 3.26 – Painel pneumático para controle das pressões de ar aplicadas.

3.3 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição automática de dados, utilizado no equipamento para ensaios *hollow cylinder*, é da marca *Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM)*, modelo *Spider 8*, gerenciado pelo programa *HBM Catman 4.5*. O *HBM Spider 8* possui: (i) 8 canais de comunicação; (ii) um soquete de entradas e saídas digitais; e (iii) uma porta paralela que permite a utilização de vários *Spider 8* simultaneamente, conectados entre si, podendo chegar a 64 canais. Os canais de 0 a 3 possuem amplificadores digitais que operam na frequência de 4,8 kHz para transdutores a base de “*strain gages*” ou transdutores indutivos (do tipo *LVDTs*). Cada canal trabalha com um conversor analógico/digital (A/D) individual que possibilita atingir taxas de aquisição de 1 leitura por segundo a 9600 leituras por segundo. Os conversores A/D são sincronizados de forma a permitir leituras simultâneas em todos os canais. Os dois primeiros canais podem também ser usados como contadores de ciclos. Os mesmos canais permitem a aquisição e processamento de sinais de transdutores de corrente contínua até 10 V. Os módulos *SR 01* (canais 4 a 7) permitem expansões para: temperatura, voltagem até 10 V, correntes até 200 mA e resistências até 4000 Ω . Um soquete separado (digital I/O) oferece 8 entradas digitais e oito linhas que podem ser usadas como entradas ou saídas digitais. As entradas digitais podem ser medidas simultaneamente com os outros canais. O soquete também pode ser utilizado como um *trigger*, ou seja, um controlador dos sistemas de aplicação de cargas.

O *Spider 8* comunica-se com o computador por meio de portas paralelas (IEEE-1284) ou seriais (RS-232). A conexão entre o *Spider 8* e os transdutores é realizada por conectores de 15 pinos ou de 5 pinos. Os conectores de 5 pinos foram utilizados apenas para os transmissores de pressão do equipamento *hollow cylinder*; para os demais sensores (células de carga e transdutores de deslocamento) foram utilizados conectores de 15 pinos. A Figura 3.27 apresenta: (a) o *Spider 8* (a), seu quadro de conectores (b), e em detalhe, os conectores de 15 pinos (c) e os conectores de 5 pinos (d). No quadro são observadas ainda as conexões: serial e paralelas, para comunicação com o computador, impressora, entre outros *Spider 8* e uma conexão de entradas e saídas digitais (Digital I/O).

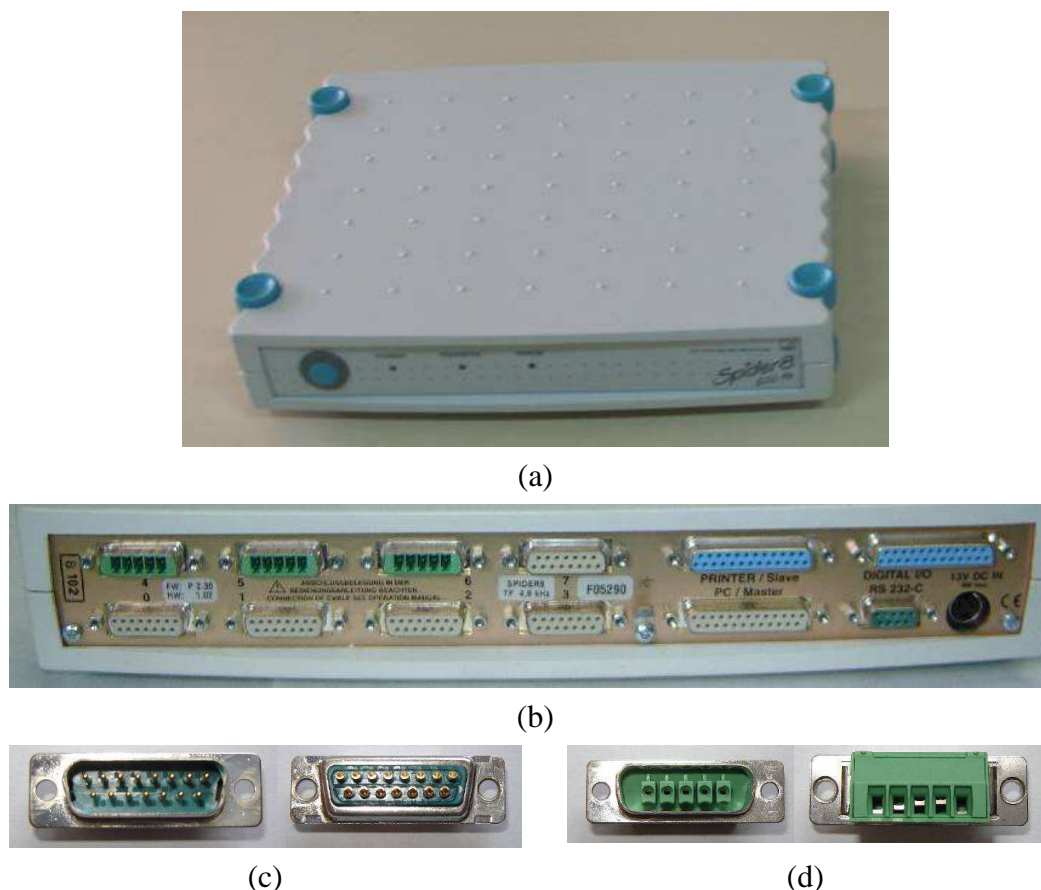


Figura 3.27 - (a) o *Spider 8* , (b) quadro de conectores, (c) conectores de 15 pinos e (d) conectores de 5 pinos.

3.3.1 HBM *Catman 4.5*

O *Catman 4.5* foi o programa utilizado para o gerenciamento da aquisição de dados. As funções utilizadas nos ensaios *hollow cylinder torsional* foram: *I/O definitions*, *Online Documents* e *Measurement Wizard*. O modo *I/O definitions* permite identificar e configurar os sensores utilizados segundo o tipo de funcionamento (indutivo, resistivo, strain gauges, etc). Além disso, é possível calibrar os instrumentos utilizando a opção “*Scaling*”. O modo *Online Documents* permite ao usuário personalizar a tela de visualização da aquisição utilizando: botões, gráficos, indicadores digitais, etc. Por fim, utilizando o modo *Measurement Wizard* são definidas as características da aquisição de dados, como: taxa de aquisição, período de aquisição, se a aquisição é contínua ou intermitente, definições de como os dados serão exportados, etc. A tela de visualização desenvolvida para os ensaios *hollow cylinder torsional* é apresentada na Figura 3.28.

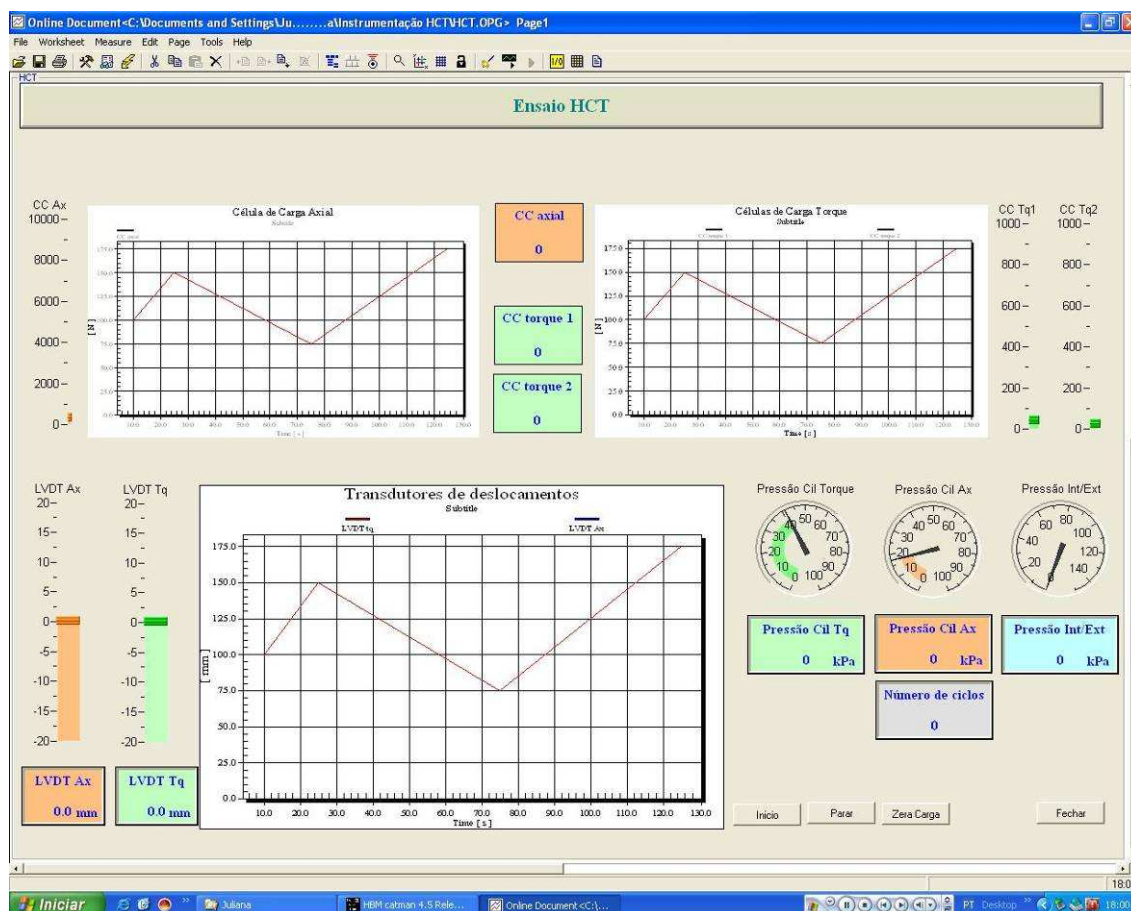


Figura 3.28 – Tela de visualização do ensaio *hollow cylinder torsional*.

3.4 Instrumentação do ensaio

A seguinte instrumentação foi empregada na realização dos ensaios *hollow cylinder torsional*: (i) célula de carga do tipo viga à flexão, com capacidade de 10 kN, para medição da carga axial; (ii) duas células de carga do tipo viga à flexão, com capacidade de 1 kN, para medição do torque; (iii) dois transdutores de deslocamento para medir os deslocamentos axial e circunferencial do corpo de prova; e (iv) transmissores de pressão para medir as pressões de ar comprimido. Todos os instrumentos foram conectados ao *Spider 8* e controlados por meio do software *HBM Catman 4.5*.

3.4.1 Células de Carga

As células de carga são confeccionadas de liga de alumínio, do tipo viga à flexão (*single point*) e fabricadas pela empresa *HBM*. O modelo adotado para a medição do carregamento axial, com capacidade de 10 kN, é o *PW12BC3*, e para medição do torque, é utilizado um par de células de carga, modelo *SP4C3*, com capacidade para 1 kN. As Figuras 3.14 e 3.21

mostram em detalhe o posicionamento das células de carga dentro da câmara de ensaio e a Figura 3.29 mostra a fotografia das mesmas. Todas as células possuem sensibilidade de 2 mV/V ($\pm 0,2$ mV/V) e excitação de referência de 5 V, mas podem suportar até 15V. As células de carga do tipo *single point* possuem compensação para cargas aplicadas fora do centro e são insensíveis a torções e flexões.

A comunicação com o sistema *Spider 8* foi realizada utilizando conectores de 15 pinos. As conexões elétricas para as células de carga *PW12BC3* e *SP4C3* são idênticas, porém o padrão de cores dos fios é diferente. As células de carga foram configuradas no sistema de aquisição de dados segundo as suas especificações de fábrica. A calibração da célula de carga axial foi verificada através da instalação de uma célula de carga já calibrada, entre a célula de carga axial e o sistema de aplicação de cargas do equipamento. Foram aplicados carregamentos diversos e efetuadas leituras simultâneas com ambas as células. Ao final do procedimento foi confirmada a validade da calibração de fábrica. A calibração das células de carga de torque também foi verificada e validada, através de aplicação de carregamentos conhecidos.

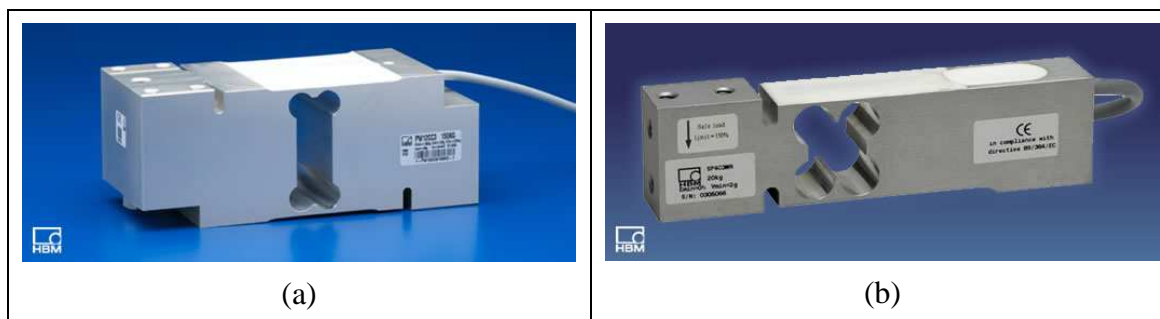


Figura 3.29 – Células de carga: (a) *HBM* modelo *PW12BC3* e (b) *HBM* modelo *SP4C3*.

3.4.2 Transdutores de deslocamento

Para medição dos deslocamentos axial e circunferencial do corpo de prova, foram utilizados transdutores de deslocamento *HS25*, fabricados pela empresa *Wykeham Farrance Int*. Este sensor possui curso de 25 mm e precisão de 0,002 mm. O transdutor que mede o deslocamento axial do corpo de prova foi posicionado fora da câmara triaxial, sob a placa de alumínio intermediária que dá suporte ao sistema de aplicação de torque. O deslocamento

circunferencial é medido dentro da câmara junto à base do corpo de prova. As Figuras 3.30 e 3.31 mostram um desenho esquemático com o posicionamento destes instrumentos no equipamento *hollow cylinder torsional*. As dimensões das peças de fixação dos transdutores podem ser conferidas nos desenhos do Anexo A. Os transdutores de deslocamento foram calibrados através de um parafuso micrométrico com curso de 25 mm, adaptado a um pórtico metálico. A aquisição destes dados no sistema *Spider 8* é realizada com conectores de 15 pinos.

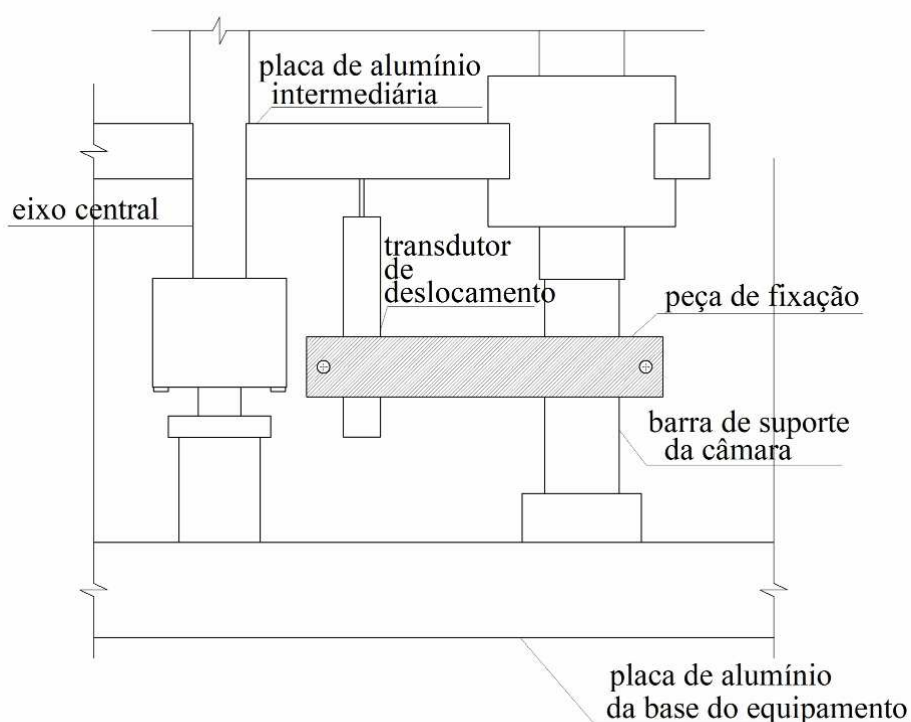


Figura 3.30 – Vista frontal do posicionamento do transdutor que mede o deslocamento axial, no equipamento *hollow cylinder torsional*.

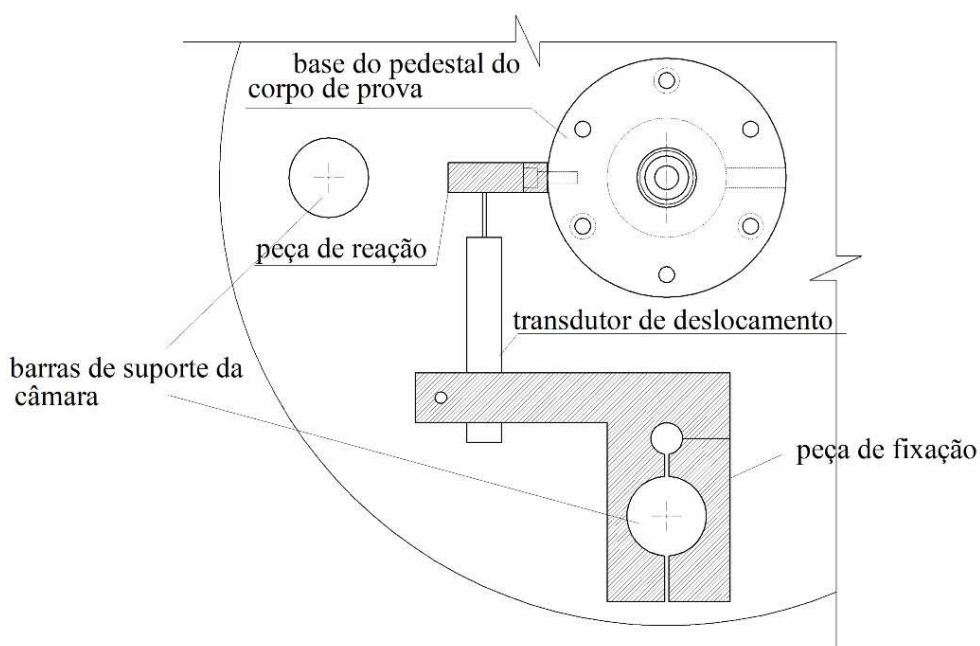


Figura 3.31 – Vista superior do posicionamento do transdutor que mede o deslocamento circunferencial, no equipamento *hollow cylinder torsional*.

3.4.3 Transmissor de pressão

Os transmissores de pressão da marca *ASHCROFT*, modelo *K1*, foram utilizados para medir a pressão de ar comprimido aplicada na câmara triaxial e nos cilindros pneumáticos. A sua pressão nominal é de 1000 kPa e, neste equipamento, foi alimentado por uma fonte externa de 24 VCC (marca *NOVUS* modelo *24V*), conforme instrução do fabricante. A comunicação com o sistema *Spider 8* foi realizada através de conectores de 5 pinos. A Figura 3.32 apresenta o transmissor de pressão e a fonte de corrente contínua. Foi utilizado um calibrador de precisão, do tipo bomba de peso morto, da marca *Budenberg*, para a calibração dos transmissores de pressão.

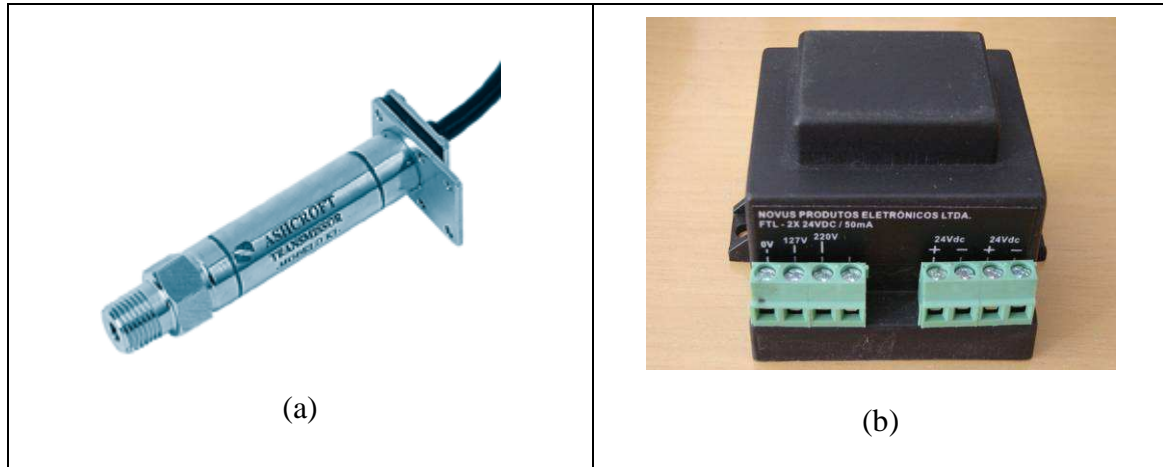


Figura 3.32 – (a) Transmissor de pressão *ASHCROFT* modelo *K1* e (b) fonte *NOVUS* modelo *24 V*.

4 MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO

Esta pesquisa utilizou um solo residual de arenito Botucatu, amostrado na região metropolitana de Porto Alegre. Martins (2001) e Núñez (1991) utilizaram amostras de solo residual de arenito Botucatu provenientes da mesma jazida, o que faz torna seus dados adequados para eventuais comparações e correlações com os resultados desta tese. Os resultados dos ensaios de caracterização e de compactação realizados no programa experimental desta tese são apresentados e analisados neste capítulo, pois seus parâmetros fornecem características básicas do material. O programa experimental desta tese, com detalhes sobre a metodologia seguida nos demais ensaios realizados, é apresentado também neste capítulo.

4.1 Solo residual de arenito Botucatu

4.1.1 O sítio da Vila Scharlau

A Figura 4.1 apresenta a região de ocorrência de rochas sedimentares onde se insere o arenito Botucatu no nosso país. No detalhe desta figura, é indicada a localização do sítio escolhido para o desenvolvimento desta pesquisa, que está situado no município de São Leopoldo, no bairro Vila Scharlau, a uma distância de aproximadamente 41 km ao norte de Porto Alegre, junto à rodovia RS-240. Neste local, um afloramento de solo residual de arenito Botucatu foi explorado como jazida de empréstimo para a construção da rodovia. O material está exposto no talude de corte, o qual apresenta declividade elevada, como pode ser observado na Figura 4.2.

O perfil estudado caracteriza-se por apresentar um horizonte A de pequena espessura (aproximadamente 0,5m) e um horizonte B variável, com espessura média de 1,5m no local. No topo do talude a área foi parcialmente aterrada. Feições estruturais do arenito Botucatu surgem a partir de 3m de profundidade e se estendem por toda a profundidade do perfil exposto – cerca de 30m. Mesmo para as maiores profundidades expostas, o material encontrado apresenta-se com características de solo residual, sendo facilmente “escavável” com a mão, segundo observação de Martins (2001).

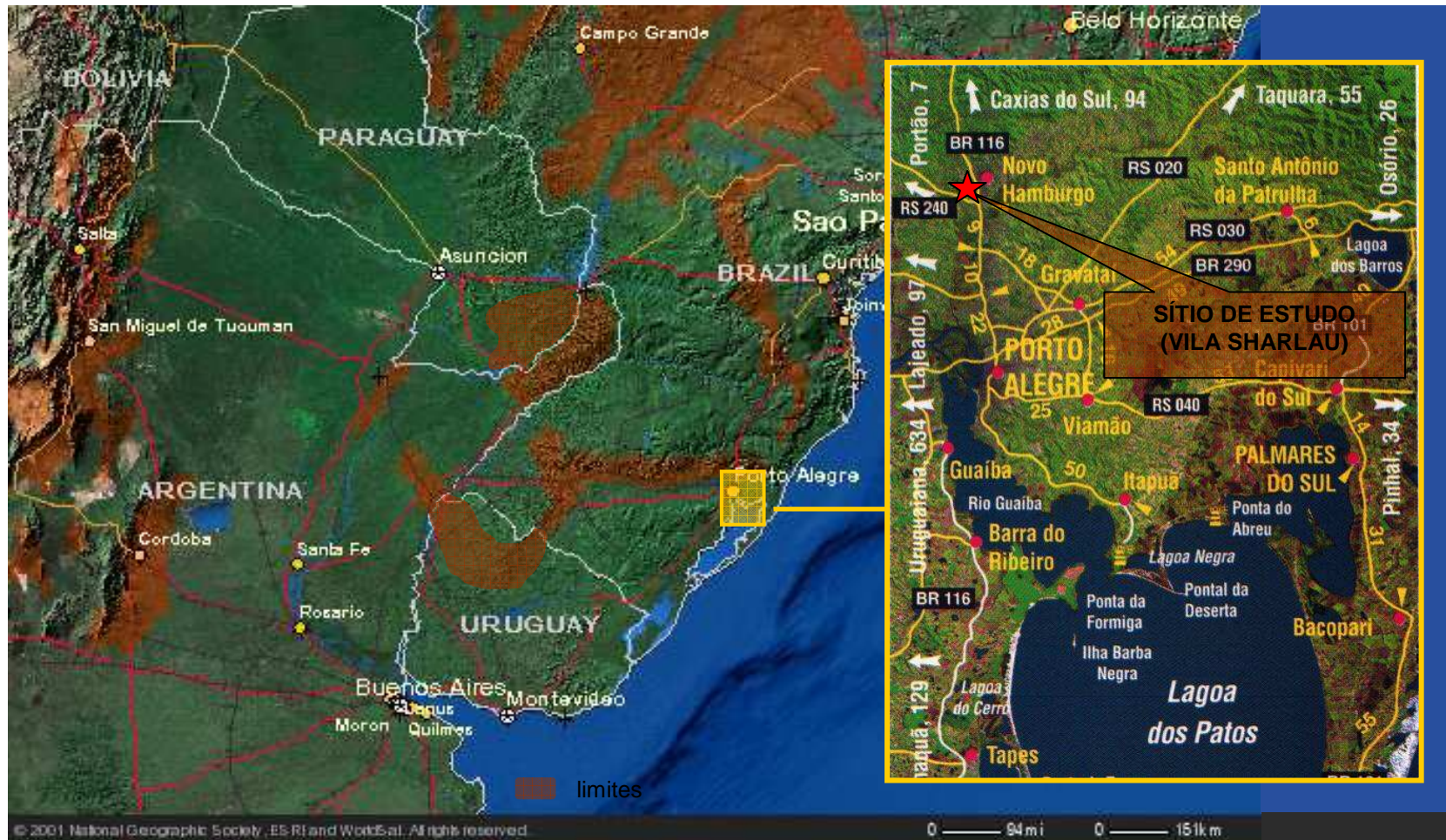


Figura 4.1 - A região de ocorrência de rochas sedimentares do Juracretáceo, onde se insere a Formação Botucatu (na cor marrom), e, no detalhe, a localização da área de estudo (IBGE, 2001; FCEyN/UBA, 1999), apresentada por Martins (2001).

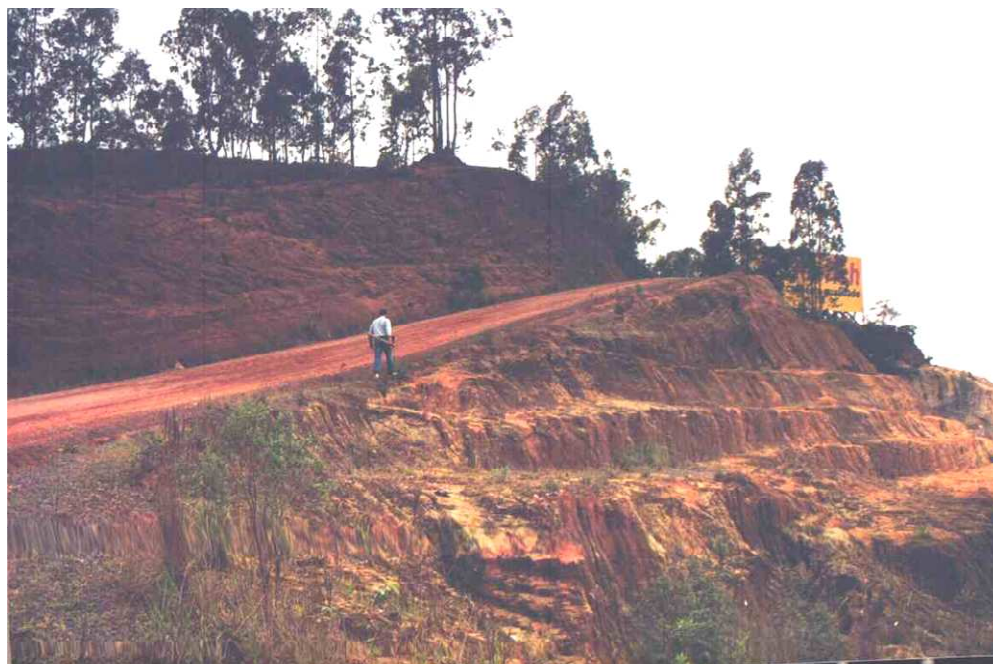


Figura 4.2 - Perfil de solo residual de arenito Botucatu da Vila Scharlau (Martins, 2001).

4.1.2 Ensaios de caracterização

Para a realização dos ensaios de caracterização e de compactação, as amostras do solo residual de arenito Botucatu, coletadas do sítio da Vila Scharlau, foram preparadas de acordo com o procedimento recomendado pela norma NBR 6457 (ABNT, 1986). A determinação dos valores de peso específico real dos grãos, limite de liquidez e limite de plasticidade seguiu as normas NBR 6508 (ABNT, 1984), NBR 6459 (ABNT, 1984) e NBR 7180 (ABNT, 1984), respectivamente. A análise granulométrica foi realizada de acordo com o procedimento recomendado pela norma NBR 7181 (ABNT, 1984). Os resultados dos ensaios de caracterização encontrados nesta pesquisa são apresentados na Tabela 4.1. A Tabela 4.2 mostra os resultados dos ensaios de caracterização apresentados por Núñez (1991) e Martins (2001) em suas pesquisas com o solo residual de arenito Botucatu. O solo utilizado por estes autores foi amostrado no mesmo local do solo desta tese, mas provavelmente em pontos em profundidades diferentes. Durante o tempo transcorrido entre estas pesquisas, o talude permaneceu aberto, exposto a variações de temperatura e umidade. Esta condição pode ocasionar variação na estrutura e nas composições granulométrica e mineralógica do solo residual de arenito Botucatu com o passar dos anos, uma vez que está mais suscetível à ação de intempéries. Apesar disso e do tempo transcorrido entre as pesquisas, os resultados dos

ensaios de caracterização foram próximos, com exceção da ausência do índice de plasticidade nas amostras de Martins (2001).

A distribuição granulométrica determinada em laboratório é apresentada na Figura 4.3. A Figura 4.4 apresenta as distribuições granulométricas desta pesquisa e dos trabalhos de Núñez (1991) e Martins (2001). Apesar da predominância da fração arenosa, o solo amostrado para esta tese encontra-se mais bem graduado, em relação às amostras ensaiadas anteriormente por Martins (2001) e Núñez (1991). Na análise granulométrica realizada por Martins (2001), o ensaio de granulometria com defloculante apresentou aproximadamente 30% do material com tamanho inferior a 0,01 mm. A forma da curva granulométrica indica a quase ausência de grãos entre os tamanhos 0,01mm e 0,07mm. Segundo a autora, este resultado está de acordo com suas análises microscópicas, que apresentaram grãos de quartzo dispersos em uma matriz secundária, composta predominantemente por caulinita.

4.1.3 Ensaios de compactação

Com o objetivo de determinar o teor de umidade ótimo e o peso específico aparente seco máximo do solo, foram realizados ensaios de compactação nas energias normal e intermediária, segundo o procedimento indicado pela norma NBR 7182 (ABNT, 1986) e pelo método de ensaio DNER ME 129/94 (DNER, 1994). Os resultados destes ensaios são apresentados na Tabela 4.3. As respectivas curvas de compactação são apresentadas na Figura 4.5, além das curvas para os teores de saturação de 100% e 80%, determinadas a partir da equação 4.1.

$$\gamma_d = \frac{S \cdot \gamma_s \cdot \gamma_w}{S \cdot \gamma_w + \gamma_s \cdot \omega} \dots\dots\dots(4.1)$$

onde:

γ_d = peso específico aparente seco do solo;

γ_s = peso específico real dos grãos do solo;

γ_w = peso específico da água;

s = grau de saturação;

w = teor de umidade.

Os graus de saturação correspondentes aos parâmetros de compactação em ambas as energias são apresentados na Tabela 4.3. Os parâmetros de compactação do solo residual de arenito Botucatu não tiveram uma variação considerável com o aumento da energia de compactação. Para ambas as energias de compactação, o valor do peso específico aparente seco parece não ser muito influenciado por teores de umidade baixos, caracterizando o ramo seco de materiais tipicamente granulares. Já o ramo úmido, tende seguir uma linha com grau de saturação aproximadamente constante.

Tabela 4.1 - Índices físicos do solo residual de arenito Botucatu, determinados em laboratório.

Parâmetro		Valor
Limite de Liquidez		21 %
Limite de Plasticidade		12%
Índice de Plasticidade		9%
Peso específico real dos grãos		26,3 kN/m ³
Granulometria ¹⁴	areia média (0,6mm- 0,2mm)	30,0%
	areia fina (0,2mm – 0,06mm)	30,8%
	silte (0,06mm – 0,002mm)	32,7%
	argila (<0,002mm)	6,5%

¹⁴ Limites definidos para as frações de solo, segundo escala granulométrica da ABNT (NBR 6502/95).

Tabela 4.2 - Índices físicos do solo residual de arenito Botucatu, obtidos por outros autores na mesma região de amostragem.

Parâmetro		Martins (2001)	Núñez (1991)
Limite de Liquidez (%)		21 %	21%
Limite de Plasticidade (%)		Não plástico	17%
Peso específico real dos grãos (kN/m ³)		26,7	26,7
Granulometria	areia média (0,6mm- 0,2mm)	25%	15%
	areia fina (0,2mm – 0,06mm)	43%	52,3%
	silte (0,06mm – 0,002mm)	27%	24,7%
	argila (<0,002mm)	5%	8%

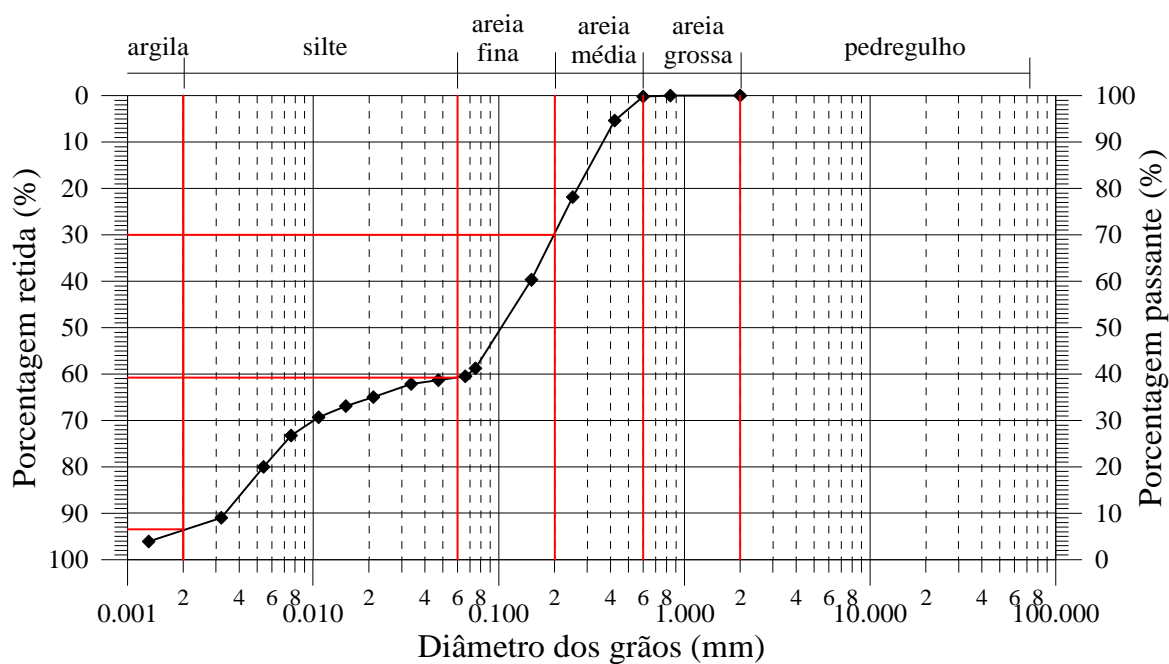


Figura 4.3 - Curva granulométrica do solo residual de arenito Botucatu.

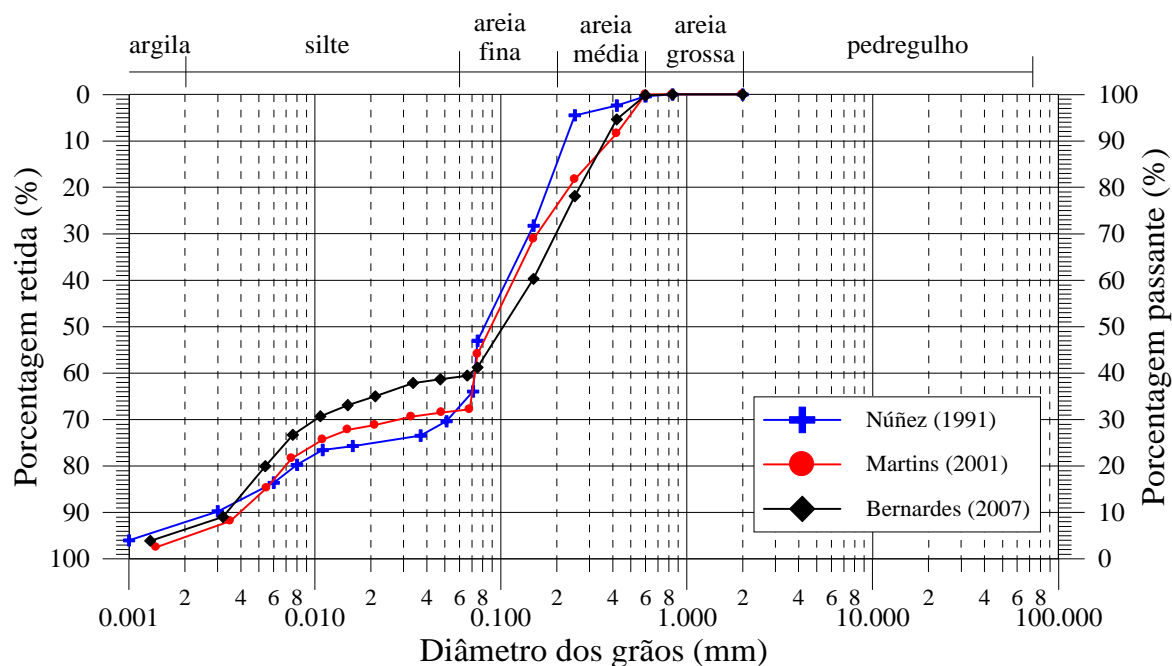


Figura 4.4 - Curvas granulométricas do solo residual de arenito Botucatu da mesma jazida, mas obtidas por diversos autores.

É de conhecimento geral que a compactação dinâmica não é a mais adequada para solos predominantemente granulares, que usualmente respondem melhor a métodos de compactação vibratórios. Solos sem coesão não respondem a variações no teor de umidade e no esforço de compactação como os solos coesivos. Lambe e Whitman (1979) exemplificam este comportamento com uma figura apresentada por Foster (1962), que mostra uma típica curva de compactação de uma areia sem coesão (Figura 4.6). Segundo os autores, a baixa densidade, que é obtida para teores de umidade baixos, deve-se às forças capilares geradas pela resistência ao rearranjo das partículas. Magistris *et al.* (1998) estudaram a influência da compactação no comportamento mecânico de uma areia siltosa e verificaram que a compactação dinâmica influencia na resposta mecânica deste material apenas em pequenos níveis de deformação. Segundo os autores, de maneira geral, estes corpos de prova apresentaram um comportamento tensão-deformação com baixa rigidez inicial e maior dilatância, quando comparados com os corpos de prova moldados por compactação estática.

Apesar da importância de uma investigação sobre o comportamento do solo residual de arenito Botucatu em relação ao método de compactação empregado, este tipo de avaliação não faz parte dos objetivos desta tese. A compactação dinâmica, utilizada nesta tese para determinação dos parâmetros de compactação e, também, para moldagem dos corpos de prova

nos ensaios triaxiais, foi adotada por ser um método relativamente simples e de amplamente utilização em laboratório.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de compactação.

Energia de compactação	$\gamma_{d\text{máx}}$ (kN/m ³)	$\omega_{\text{ót}}$ (%)	S (%)
Normal	18,7	12,8	83
Intermediária	19,3	11,3	82

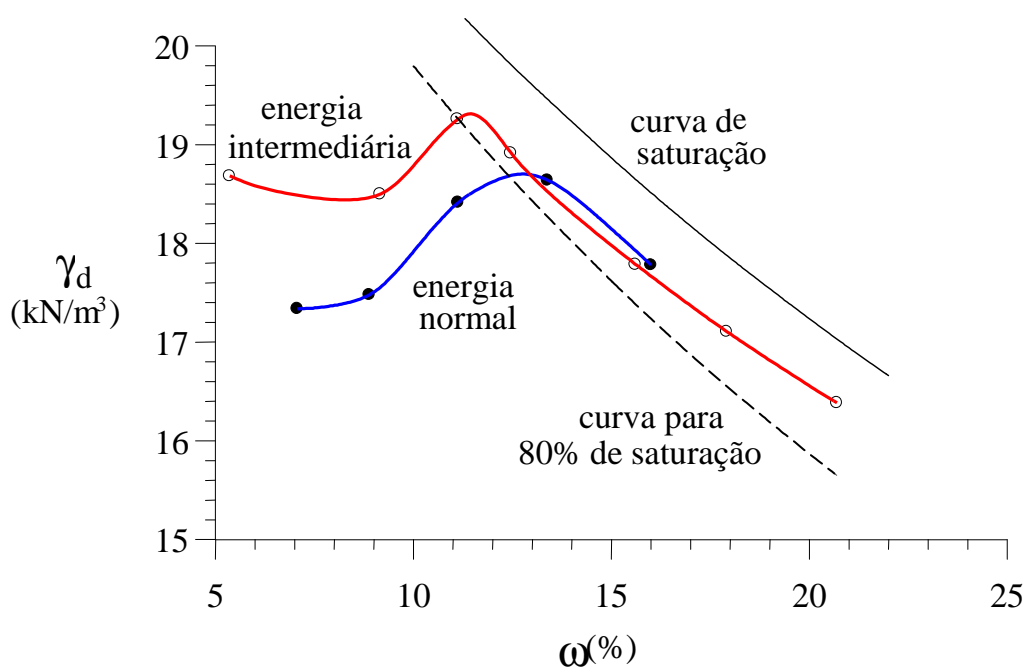


Figura 4.5 - Curvas de compactação do solo residual de arenito Botucatu determinadas nas energias normal e intermediária.



Figura 4.6 – Típica curva de compactação para areias sem coesão (Foster, 1962 *apud* Lambe e Whitman, 1979).

4.1.4 Ensaio para determinação do Índice suporte Califórnia

Corpos de prova moldados com os parâmetros determinados nos ensaios de compactação, nas energias de compactação normal e intermediária, foram submetidos ao ensaio ISC. Os ensaios foram realizados segundo os procedimentos recomendados pela norma NBR 9895 (ABNT, 1987) e pelo método de ensaio DNER ME-049 (DNER, 1994). A Tabela 4.4 apresenta estes resultados.

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios ISC.

Energia de compactação	ISC (%)
Normal	6,0%
Intermediária	17,1%

4.2 Programa experimental de laboratório

4.2.1 Ensaio triaxiais de carregamento repetido

Foram realizados ensaios triaxiais de carregamento repetido, para determinação do módulo de resiliência, em amostras de solo residual de arenito Botucatu compactadas nas energias de compactação normal. Também foram realizados ensaios triaxiais de deformação

permanente, com multi-estágios de carga. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAPAV).

4.2.1.1 Moldagem dos corpos de prova

Foram moldados corpos de prova compactados com 100mm de diâmetro e 200mm de altura. A moldagem dos corpos de prova foi realizada em um molde tripartido e o procedimento de compactação foi executado com compactador manual, em 5 camadas, obtendo-se a massa específica aparente seca dos ensaios de compactação, na energia de compactação normal. A Figura 4.7 mostra um corpo de prova na câmara triaxial, após a realização de um ensaio para determinação do módulo de resiliência.

4.2.1.2 Determinação do módulo de resiliência

A determinação do módulo de resiliência é padronizada pelo método de ensaio DNER ME 131/94 (DNER, 1994) e pela norma norte-americana AASHTO - TP46-94 (AASHTO, 1994). O método de ensaio do DNER especifica que, após a preparação do corpo de prova na câmara triaxial, seja feito um condicionamento inicial. Esta fase de condicionamento tem como objetivo eliminar ou minimizar os efeitos da deformação plástica e da história de tensões do solo (Medina e Motta, 2005).

Para cada estado de tensões deve-se aplicar um total de 200 ciclos de carga, tanto para a fase de condicionamento quanto para a fase de carregamento (onde são medidas as deformações resilientes). Após cada estágio de aplicação de carga é registrada a deformação resiliente referente ao mesmo estado de tensões, o que é feito tomando-se a média dos cinco últimos pulsos de carga.

O método de ensaio especificado pela norma DNER – ME 131/94 determina que sejam aplicados 20 ciclos de carga a cada minuto, o que resulta em uma frequência de 0.33 Hz. Porém, o equipamento do LAPAV aplica 1 ciclo por segundo ou 1 Hz, para se adequar a procedimentos internacionais. A duração de aplicação da carga deve ser de 0,1 s. O equipamento do LAPAV possui dois transdutores de deslocamento do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*), posicionados internamente à câmara triaxial, para o registro dos deslocamentos axiais ao longo da porção central do corpo de prova. Os dados registrados pelos sensores são gravados e visualizados com o auxílio de um sistema de aquisição de dados. A rotina computacional desenvolvida para a execução dos ensaios registra

as deformações axiais produzidas pelo carregamento e também calcula os módulos de resiliência para cada estado de tensões.

O módulo de resiliência é calculado a partir da Equação 4.2 e a deformação resiliente com a Equação 4.3:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_R} \quad (4.2)$$

$$\epsilon_R = \frac{\Delta h}{H_o} \quad (4.3)$$

onde :

MR = módulo de resiliência;

σ_d = tensão desvio aplicada repetidamente;

ϵ_R = deformação específica resiliente ;

Δh = variação da altura do corpo de prova em cada ciclo de carga;

H_o = altura inicial do corpo de prova;

Para materiais granulares, os resultados são apresentados em gráficos, em escala logarítmica, onde os valores de módulo resiliente calculados são plotados no eixo das ordenadas, e os valores de pressão de confinamento, no eixo das abscissas. O modelo de regressão estatística, sugerido pelo método de ensaio do DNER, é representado pela Equação 4.4.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_c^{k_2} \quad (4.4)$$

onde:

σ_c = pressão de confinamento;

k_1 e k_2 = parâmetros do modelo de regressão estatística.

Em Preussler (1983) também são citadas as definições de Biarez (Equação 4.5) e Dunlap (Equação 4.6) para o cálculo do módulo resiliente de solos arenosos.

$$MR = k_1 \cdot \theta^{k_2} \quad (4.5)$$

$$MR = k_3 + k_4 \cdot (\sigma_r + \sigma_\theta) \quad (4.6)$$

onde:

k_1 e k_2 = parâmetros determinados experimentalmente;

θ = somatório das tensões principais ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$), no caso de compressão triaxial ($\sigma_1 + 2\sigma_3$);

k_3 = módulo para condição não confinada;

σ_r = tensão radial;

σ_θ = tensão tangencial;

k_4 = parâmetro determinado experimentalmente.

Para solos argilosos ou siltosos, os resultados podem ser apresentados em um gráfico, cujas ordenadas são os valores dos módulos de resiliência, e as abscissas, os valores de tensão desvio. A análise de regressão fornece um modelo bilinear, representado pelas equações:

$$MR = k_2 + k_3 \cdot (k_1 - \sigma_d) \quad \text{para } k_1 > \sigma_d \quad (4.7)$$

$$MR = k_2 + k_4 \cdot (\sigma_d - k_1) \quad \text{para } k_1 < \sigma_d \quad (4.8)$$

onde :

k_1, k_2, k_3, k_4 = parâmetros de resiliência do solo ensaiado.

A Figura 4.8 apresenta a câmara triaxial utilizada para determinação do módulo de resiliência, durante a realização de um ensaio com o solo estudado nesta pesquisa.

4.2.1.3 Resistência a deformações permanentes

Os procedimentos de ensaio utilizados nesta tese seguiram a metodologia adotada por Malysz (2004) que se baseou na bibliografia consultada devido à inexistência de normas brasileiras sobre o assunto. Os ensaios foram realizados na mesma câmara triaxial que os ensaios de módulo de resiliência. Foi utilizado um transdutor de deslocamento resistivo do tipo RDT (*Rectilinear Displacement Transducer*), fabricado pela empresa italiana *Gefran*, modelo *LTM 50 S*, com um curso de 50mm. Este transdutor encontra-se instalado no pistão de cargas, externamente à câmara triaxial, para a medição dos deslocamentos axiais.

Este tipo de ensaio requer menor interação do operador em relação aos ensaios de módulo de resiliência, já que é utilizado um único estado de tensões. Porém, pode ser bem mais demorado, requerendo, em alguns casos, até 10^6 aplicações cíclicas de carga (Malysz, 2004). Autores como Arnold *et al.* (2004) afirmam que 50.000 ciclos são suficientes para caracterizar o comportamento do material em relação às deformações permanentes. Mesmo no caso dos ensaios realizados com carregamento em multi-estágios, as aplicações de carga podem se prolongar em até um dia, sem intervenções periódicas do operador.

Os ensaios de deformações permanentes foram realizados segundo o método de carregamento em multi-estágios. Neste tipo de procedimento são aplicados estados de tensões crescentes a cada estabilização de comportamento das deformações permanentes. Ou seja, se as deformações permanentes cessam ou atingem uma taxa de incremento constante no tempo, um incremento de tensões pode então ser imposto ao sistema. Conforme já mencionado, em geral, 50.000 ciclos são suficientes para estabelecer o comportamento do material em relação às deformações permanentes, porém como os ensaios serão realizados na frequência de 1 Hz, este número de ciclos é geralmente atingido durante o período noturno. Por este motivo, o número de ciclos definido para os incrementos de tensão foi de 80.000 ciclos, correspondendo a aproximadamente 1 dia de ensaio.



Figura 4.7 – Corpo de prova de solo residual de arenito Botucatu, compactado para ensaio triaxial.



Figura 4.8 - Ensaio triaxial de carga repetida para determinação do módulo de resiliência em um corpo de prova compactado de solo residual de arenito Botucatu.

Para os estados de tensões mais baixos, Malysz (2004) verificou que os resultados obtidos segundo a modalidade de multi-estágios são muito parecidos com os resultados obtidos em corpos-de-prova virgens (isto é, um novo corpo-de-prova para cada estado de tensões). Para estados de tensões mais elevados, as deformações registradas em corpos de prova virgens são maiores que as obtidas em ensaios multi-estágios. Este comportamento pode ser justificado pelo fato de que, em ensaios multi-estágio, o corpo de prova sofre um enrijecimento, pois foi submetido a diferentes estados de tensões.

A Figura 4.9 mostra a evolução típica das deformações permanentes medidas em ensaios triaxiais de carga repetida, onde são observadas três fases do comportamento: deformações permanentes iniciais (ϵ_{pi}), taxa de deformações permanentes (TDP) constante e incremento de TDP . A terceira fase do comportamento, denominada incremento de TDP ou Colapso Incremental, ocorre somente no caso de o material sofrer a imposição de um estado de tensões que não pode suportar. Normalmente, em pavimentos bem dimensionados, este estágio não ocorre (Malysz, 2004).

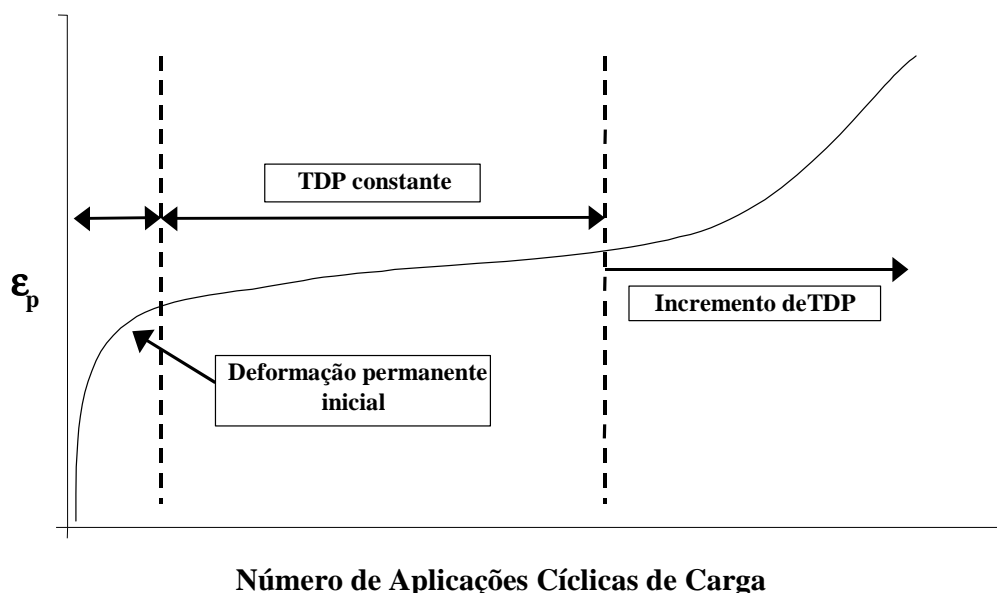


Figura 4.9 – Comportamento típico quanto às deformações permanentes.

As leituras da instrumentação foram realizadas tomando-se por referência os intervalos estabelecidos por Niekerk *et al.* (2000): de 100 em 100 ciclos durante os primeiros 1.000 ciclos de carga, de 1.000 em 1.000 ciclos durante os primeiros 10.000 ciclos, e após, com aproximadamente 20.000, 30.000, 40.000 e 80.000 ciclos.

Foram realizados três ensaios em multi-estágios de carga, com pressões confinantes de 21, 35 e 53 kPa respectivamente. Para cada ensaio, a primeira tensão desvio aplicada é igual à pressão confinante, e cada incremento corresponde a um acréscimo de tensão de igual valor da pressão confinante; portanto os degraus alinhados entre si nas três curvas, referentes a cada pressão de confinamento, representam relações σ_d/σ_c idênticas, variando de 1 a 5.

Os resultados dos ensaios triaxiais de carga repetida, segundo a modalidade multi-estágios de carga, apresentam, como resultado, curvas sucessivas, onde cada degrau corresponde a um estado de tensões diferente. A Figura 4.10 apresenta um gráfico ilustrando o resultado típico deste ensaio. Cada degrau deve ser isolado e a partir destes são calculados os parâmetros ε_{pi} e TDP conforme mostra a Figura 4.11, segundo a metodologia proposta por Malysz (2004). Como pode ser observado *nesta* figura, a curva apresenta duas fases distintas. Na primeira fase há uma acréscimo acentuado de deformações permanentes nos primeiros ciclos de carga, o que determina o parâmetro ε_{pi} . Após a fase inicial ocorre um acomodamento das deformações e então a curva passa a apresentar uma declividade constante, o que determina o parâmetro TDP .

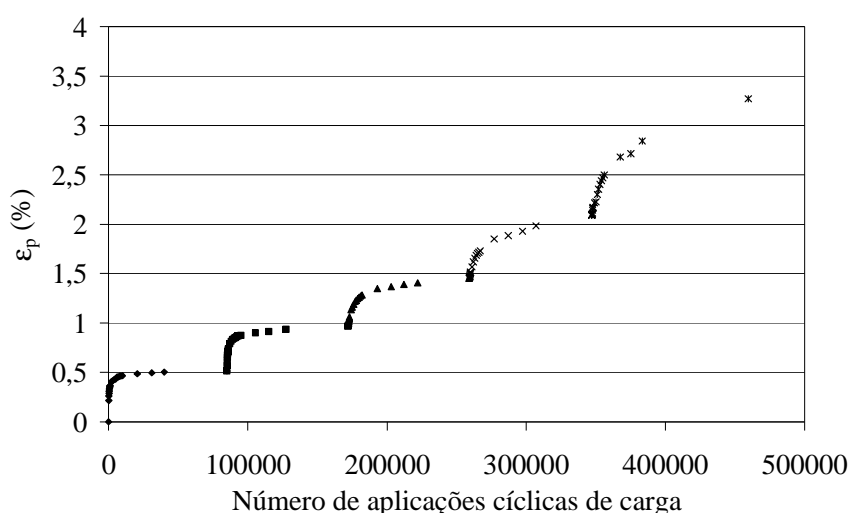


Figura 4.10 – Resultado típico de ensaios triaxiais de deformações permanentes em multi-estágios, Malysz (2004)

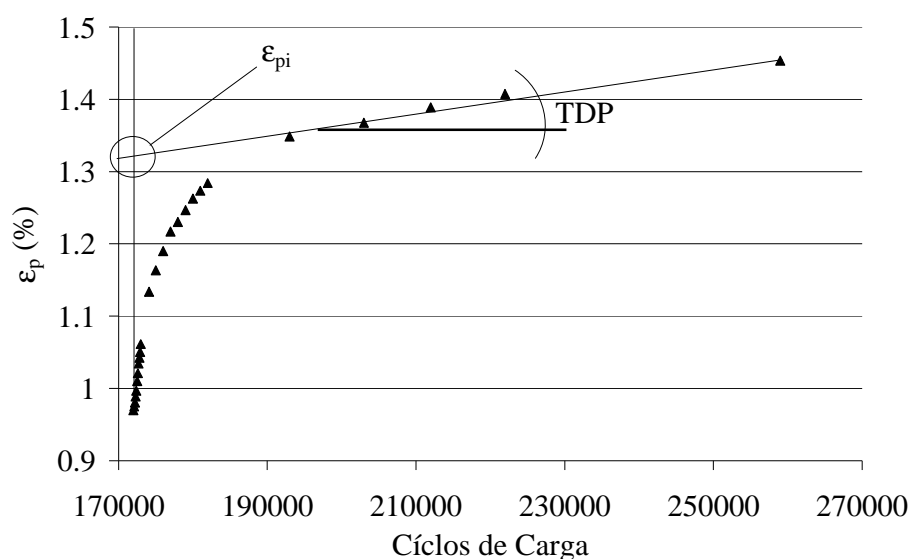


Figura 4.11 – Obtenção dos parâmetros ε_{pi} e TDP (Malysz, 2004).

4.2.2 Ensaios *hollow cylinder torsional*

Foram realizados ensaios *hollow cylinder* torsionais, com carregamento axial estático e cíclico e aplicação de torque estático, que objetivaram primordialmente validar o funcionamento do equipamento. A metodologia foi desenvolvida à medida que os ensaios foram realizados, pois um equipamento deste porte demanda uma fase exaustiva de testes preliminares. São apresentados, a seguir, detalhes sobre a moldagem e utilização do equipamento, bem como o procedimento de ensaio utilizado no programa experimental desta tese.

4.2.2.1 Dimensões do corpo de prova

O corpo de prova para o ensaio *hollow cylinder* possui as seguintes dimensões: diâmetro interno de 60 mm, diâmetro externo de 100 mm e altura de 200 mm. A escolha destas dimensões baseou-se na literatura consultada (ver Quadro 2.4), e também nas condições de moldagem. A relação de 1/2 entre o diâmetro externo e a altura do corpo de prova foi escolhida de modo que o comprimento do terço médio do corpo de prova fosse livre dos efeitos da não-uniformidade de tensões e deformações que se desenvolvem nas suas extremidades. Estas dimensões se aproximam das relações entre raio externo, interno e altura

de corpos de prova para o ensaio *hollow cylinder* propostas por Saada e Townsend (1981), onde $h \geq 5,44\sqrt{r_e^2 - r_i^2}$ e $n = r_i / r_e \geq 0,65$. Com as dimensões selecionadas tem-se:

$$5,44\sqrt{5^2 - 3^2} = 21,76\text{cm}$$

$$3/5 = 0,6$$

Estas relações são aproximações conservadoras, portanto valores próximos aos propostos por estes autores foram considerados satisfatórios na seleção das dimensões do corpo de prova.

4.2.2.2 Moldagem do corpo de prova e instalação na câmara triaxial

O método de moldagem desenvolvido nesta tese baseia-se no método utilizado por Chaudhary *et al.* (2002), referenciado pelos autores como “*dry rodding method*”. O método consiste basicamente em compactar a amostra por um processo de “pisoteamento”, realizado através de sucessivos golpes com uma vareta de diâmetro inferior à parede do corpo de prova. Foi utilizada uma vareta confeccionada em aço, com 8 mm de diâmetro.

Este método foi adotado pela sua praticidade e facilidade de execução. Cabe salientar que o método de moldagem é de grande importância em ensaios *hollow cylinder*, pois a escolha do método adequado ao solo e ao tipo de ensaio pode ter grande influência nos resultados. Como o objetivo principal desta tese é validar a utilização do equipamento, o método de moldagem adotado privilegiou primeiramente a praticidade. A seqüência de moldagem é descrita e ilustrada a seguir:

g) Preparação da amostra de solo:

A amostra deve ser preparada com antecedência, de modo que possua o teor de umidade desejado e esteja homogênea no momento da moldagem do corpo de prova. Com o objetivo de se obter um peso específico muito próximo ao peso específico aparente seco máximo, adotou-se para os ensaios realizados nesta tese o teor de umidade ótimo, determinado no ensaio de compactação na energia Proctor normal (ver Tabela 4.3).

h) Preparação do equipamento:

Previamente à moldagem, devem ser instalados o papel filtro e as pedras porosas na peças de base e topo do corpo de prova do ensaio *hollow cylinder*. Cavidades com 14 mm de diâmetro e 3,5 mm de profundidade foram usinadas nas referidas peças, para fixação das pedras porosas. Sob estas cavidades, existem pequenos orifícios que conduzem, caso houver, a água drenada do corpo de prova para fora da câmara triaxial, evitando assim a geração de poro-pressão no corpo de prova durante o ensaio *hollow cylinder*. Para minimizar o risco de colmatação das pedras porosas, tiras de papel-filtro foram fixadas sobre as mesmas. A Figura 4.12 mostra as pedras porosas e os papéis-filtro, respectivamente, já instalados nas peças de base e topo do corpo de prova. As peças de base e topo do corpo de prova já devem estar fixadas ao pedestal e ao cabeçote do corpo de prova antes do início da moldagem.

i) Instalação das membranas interna e externa:

Foram confeccionadas membranas internas e externas em látex, com aproximadamente 0,4 mm de espessura, para os ensaios *hollow cylinder*. A fixação da membrana interna no pedestal do corpo de prova é feita por meio de anéis *O-ring*. Cavidades próprias para este fim foram usinadas no pedestal e no cabeçote do corpo de prova. A Figura 4.13 mostra a membrana interna fixada no pedestal do corpo de prova antes da moldagem. A membrana externa é posicionada sobre o conjunto base + pedestal e então o molde externo é colocado.

j) Instalação dos moldes externo e interno:

O molde externo foi confeccionado em aço inoxidável, é tri-partido e possui, no seu sentido circunferencial, uma ranhura para alojar o anel *O-ring* que fixa a membrana externa ao pedestal. Nas superfícies laterais de corte do molde foram fixadas tiras de borracha para garantir a completa vedação do conjunto. Em uma das três partes do molde há um pequeno tubo com a finalidade de retirar o ar que fica entre a membrana externa e o molde, por meio de uma bomba de vácuo. A Figura 4.14 mostra uma fotografia com o detalhe da cavidade para

o anel *O-ring* no molde e a tira de borracha colada em uma das superfícies laterais de corte desta peça. O molde interno é composto de três peças e também foi confeccionado em aço inox. Um cilindro vazado e bi-partido, de alumínio, com diâmetro inferior ao diâmetro interno ao corpo de prova, é instalado dentro da membrana interna, que já se encontra fixada no pedestal do corpo de prova. Uma barra circular de aço maciço é inserida na cavidade interna do cilindro bi-partido, promovendo o afastamento de ambas as partes de modo que o diâmetro externo deste cilindro seja então igual ao diâmetro interno do corpo de prova. Após o término da moldagem, esta barra, que mantém o molde bi-partido posicionado no centro do corpo de prova, é puxada para fora do conjunto, fazendo com que as partes do molde se soltem e sejam facilmente retiradas, sem danificar o corpo de prova. A Figura 4.15 mostra o conjunto: moldes externo e interno e membranas interna e externa, montados para iniciar o processo de moldagem do corpo de prova.



(a) pedras porosas



(b) papel filtro

Figura 4.12 – Base e topo do corpo de prova com as pedras porosas (a) e o papel filtro (b).

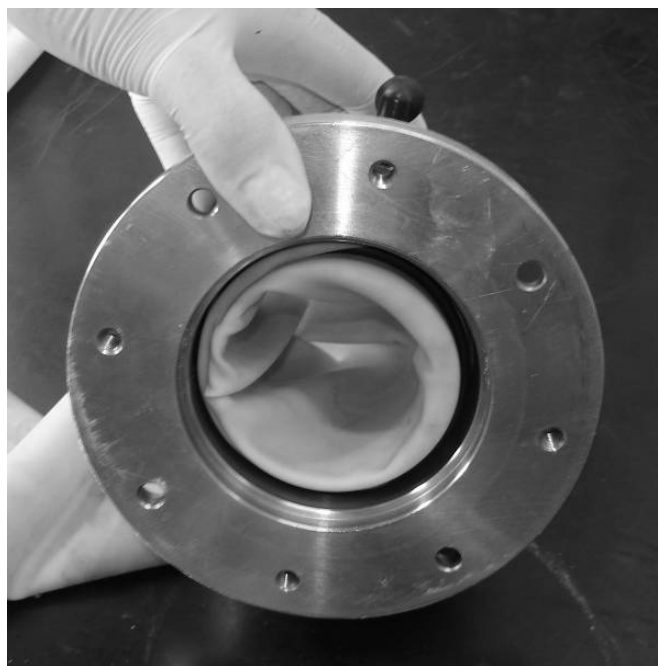


Figura 4.13 – Ranhura pra instalação da membrana interna no pedestal do corpo de prova.

k) Moldagem do corpo de prova:

Após a montagem dos moldes e a aplicação de vácuo no molde externo, inicia-se o processo de moldagem do corpo de prova para o ensaio *hollow cylinder*. Calcula-se a quantidade de material necessária para alcançar o peso específico desejado e procede-se à moldagem por camadas. Inicialmente o solo foi dividido em cinco camadas de mesma espessura, mas o peso específico alcançado foi muito baixo, então o número de camadas foi aumentado para dez, o que ocasionou uma melhora significativa na densidade do corpo de prova. Após a colocação de uma camada de solo dentro do molde, inicia-se o processo de “pisoteamento”. O número de golpes é indeterminado, pois depende de como o solo responde à energia aplicada. Procurou-se compactar cada camada o máximo possível, para que se obtivesse um corpo de prova com características de compactação próximas às determinadas na energia Proctor normal. A Figura 4.16 mostra uma fotografia corpo de prova sendo compactado.

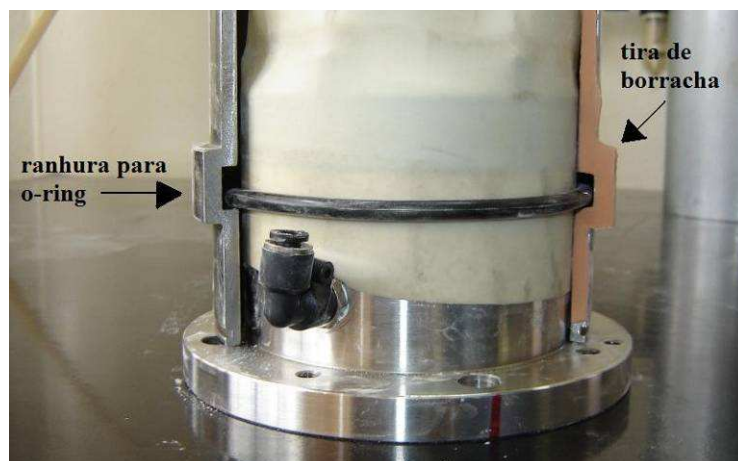


Figura 4.14 – Ranhura para alojar o anel *O-ring* no molde externo.



Figura 4.15 – Membranas interna e externa e moldes externo e interno do corpo de prova, posicionado no pedestal para o início da moldagem.



Figura 4.16 – Compactação do solo por “pisoteamento”.

l) Retirada dos moldes e instalação do corpo de prova na câmara triaxial:

Após a finalização da moldagem, a peça de topo, juntamente com o cabeçote do corpo de prova, deve ser posicionada sobre a amostra. É importante que estas peças sejam alinhadas com as peças de base e do pedestal do corpo de prova, pois a instalação deste conjunto no interior da câmara triaxial deve ser feita na posição correta para o ensaio. As palhetas da peça de topo são “cravadas” no corpo de prova, a localização das mesmas é marcada antes da cravação (ver Figura 4.17). Após a instalação do topo e do cabeçote do corpo de prova o molde interno é retirado. A membrana interna é então fixada no cabeçote, da mesma forma que foi fixada no pedestal. Todo conjunto é posicionado dentro da câmara triaxial do equipamento *hollow cylinder* e o sistema de medição de torque é instalado e ajustado. Desta forma, quando o molde externo é retirado, o corpo de prova está pronto para iniciar o ensaio. A Figura 4.18 mostra o corpo de prova instalado na câmara triaxial (a) antes e (b) depois da retirada do molde.



Figura 4.17 – Marcação da posição das palhetas no topo do corpo de prova antes da cravação da peça de topo.

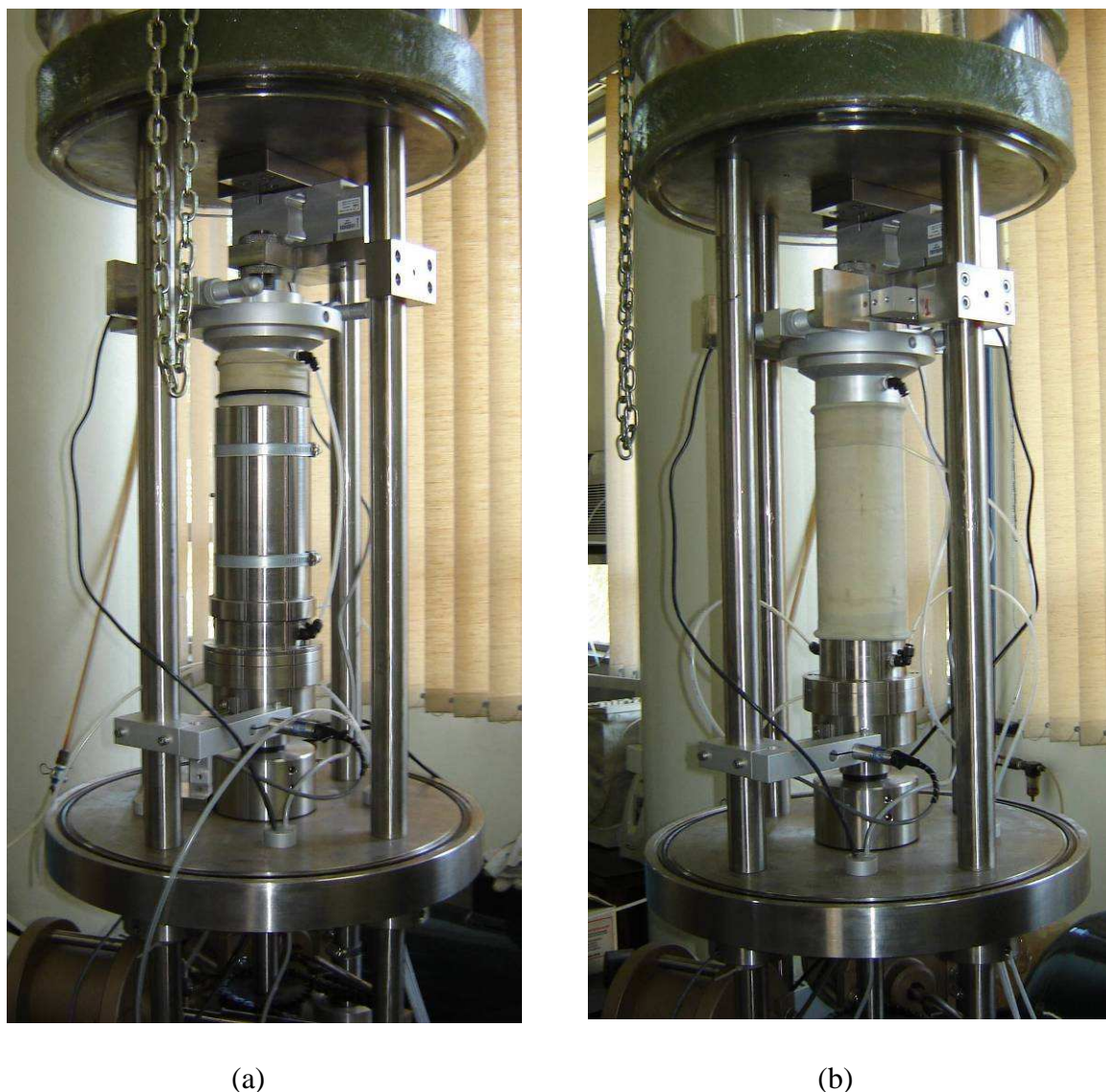


Figura 4.18 – Instalação do corpo de prova na câmara triaxial: (a) com o molde externo e (b) após retirada do molde.

m) Cuidados na moldagem e desmoldagem do corpo de prova:

Cabe salientar que um cuidado extra deve ser tomado com a membrana interna durante a compactação do corpo de prova, e principalmente antes de iniciar a retirada do molde interno. Na desmoldagem, alguns corpos de prova foram perdidos, pois a membrana prendeu nas extremidades do molde interno impossibilitando sua retirada. Para evitar esta situação é imprescindível que a membrana não tenha enrugado ou girado durante o processo de compactação e que seja utilizado bastante talco na interface membrana molde. O tipo de látex utilizado na confecção das membranas também tem influência. Após a

ocorrência de alguns incidentes durante o processo de moldagem foi observado que haviam algumas membranas mais rugosas, o que dificultava o deslizamento do molde interno no seu processo de retirada. Observou-se que quanto mais lisa a membrana, mais fácil era o processo de desmoldagem.

Outra preocupação durante a moldagem foi a possibilidade de que membrana interna fosse danificada pelos golpes aplicados com a vareta. Caso isto ocorresse, o problema só seria constatado durante o ensaio, pela falta de aderência da membrana externa no corpo de prova durante a aplicação de pressão confinante.

Um problema recorrente no final da moldagem, diz respeito à cravação da peça de topo do corpo de prova. Como as ranhuras são do tamanho da parede do corpo de prova, ao cravar a peça, a membrana externa sofria uma pequena lesão. Esta ocorrência foi facilmente solucionada com a aplicação de cola de silicone no ponto onde a membrana havia sido danificada. A aplicação era feita com o corpo de prova já instalado na câmara e promovia com eficiência a vedação da membrana. O dano na membrana externa não compromete o ensaio, mas impossibilita o reaproveitamento da mesma. A peça de topo do corpo de prova deverá ser reusinada para evitar este problema.

4.2.2.3 Problemas detectados na realização dos ensaios *hollow cylinder*

A seguir são apresentados alguns problemas detectados durante a execução dos ensaios, que podem influenciar os resultados obtidos, e que serão futuramente contornados. Os ensaios *hollow cylinder* realizados nesta tese objetivaram principalmente validar o funcionamento do equipamento desenvolvido, mas percebe-se que ainda haverá uma fase adicional de ajustes de refinamento pela frente.

a) Compressor de ar:

Conforme apresentado no item 3.2, entre o compressor de ar e o quadro pneumático do equipamento há um tanque de armazenamento de ar comprimido. Quando a pressão de ar no interior deste tanque cai a um determinado nível, o compressor de ar é automaticamente ligado e então o tanque volta a ficar cheio. Observou-se que, tão logo o compressor é ligado, as pressões de ar aplicadas nos cilindros de carga axial e de torque caem bruscamente, e assim que o compressor é desligado, as mesmas tendem a

retornar aos valores anteriores à queda. Outra observação importante é que, durante o ensaio, a pressão de ar aplicada no cilindro de carga axial sobe lentamente, a uma taxa crescente de acordo com o nível de ar comprimido que há no tanque. Futuramente pretende-se investigar esta questão com mais minúcia, mas a hipótese mais provável é que o problema se deva a alguma imprecisão do modelo de regulador de pressão de ar utilizado, pois o mesmo problema não ocorre com a pressão confinante que é controlada por um modelo de regulador diferente, de maior precisão, embora de menor vazão (ver Quadro 3.2). É possível que o modelo de regulador de pressão de ar utilizado para controlar as pressões nos cilindros de carga axial e de torque não seja capaz de manter constante a pressão aplicada, principalmente para valores mais baixos de pressão, conforme observado em alguns ensaios. No momento esta ocorrência não foi considerada preocupante, pois toda a variação na pressão de ar aplicada no cilindro grande é detectada pela célula de carga axial. A Figura 4.19 ilustra o crescimento da pressão de ar aplicada à medida que ensaio se desenvolve, e as quedas ocasionadas pelo ligamento periódico do compressor de ar. Esta figura foi extraída de um trecho do ensaio EST 7, apresentado em detalhes na Capítulo 5. Como pode ser observado, apesar do acréscimo de pressão de ar com a diminuição do nível do reservatório e as quedas em função do ligamento periódico do compressor, a pressão de ar se mantém em média um pouco acima do valor estipulado para o ensaio. Quando a variação torna-se grande durante o ensaio, a pressão de ar pode ser reajustada no quadro pneumático.

b) Posicionamento dos pistões de torque:

Inicialmente, acreditava-se que os pistões de torque deveriam, no início do ensaio *hollow cylinder*, permanecer encostados nas placas fixadas às suas respectivas células de carga e quaisquer leituras destas células, anteriores à aplicação do torque, deveriam ser descontadas. Porém, a influência da carga axial nas leituras destas células de carga mostrou-se significativa e difícil de ser separada da reação ao torque quando as mesmas já eram solicitadas desde o início do ensaio. Após a realização de vários ensaios preliminares, foi concluído que é imprescindível que os pistões de torque estejam desencostados das células de carga ao ser aplicada a carga axial. Portanto, a solução deste problema está associada ao procedimento de instalação do corpo de prova na câmara. A possível explicação é algum atrito desenvolvido entre a ponta do pistão de torque e a respectiva placa da célula de carga para medição de torque durante a

aplicação da carga axial; este atrito poderia ser minimizado com a utilização de rolamentos.

- c) Transdutor de deslocamento axial montado sob a placa de alumínio intermediária:

Como apresentado no item 3.4.2, o transdutor de deslocamento que mede a deformação axial do corpo de prova está situado fora da câmara triaxial, instalado sob a placa de alumínio intermediária, que suporta o sistema de aplicação de torque. Nos ensaios com carga axial estática, não foi possível observar a influência que este posicionamento teria na medida da deformação do corpo de prova, pois os resultados obtidos foram coerentes e satisfatórios. Porém ao realizar ensaios cíclicos, na tentativa de determinar o módulo de resiliência do material no equipamento *hollow cylinder torsional*, verificou-se que os deslocamentos medidos são maiores do que esperados. Concluiu-se que estas medidas, além de incluir a deformação do corpo de prova, incluem também uma parcela de deformação do conjunto de peças que existem entre o topo da câmara triaxial e o transdutor de deslocamento. Portanto, os deslocamentos axiais medidos nesta tese fornecem uma medida aproximada de deformação do corpo de prova e uma clara tendência de comportamento, mas não podem ser utilizados para determinação de módulos de resiliência. Futuramente poderá ser desenvolvido um sistema de fixação do transdutor de deslocamento axial dentro da câmara triaxial, de modo que o mesmo meça o deslocamento do corpo de prova com mínima influência da deformabilidade do próprio equipamento. O futuro desenvolvimento de instrumentação para medição local de deformações também solucionará este problema.

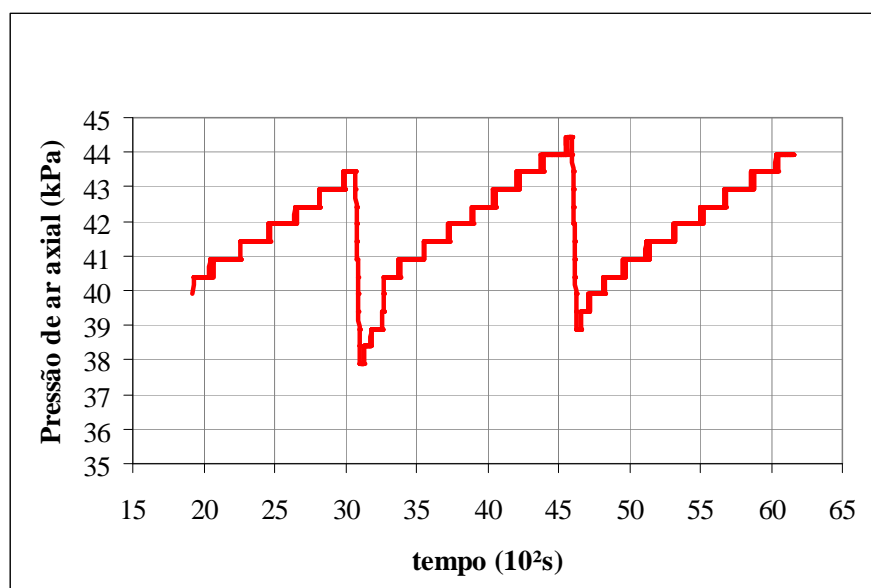


Figura 4.19 – Variação da pressão de ar no cilindro de carga axial durante o ensaio *hollow cylinder*.

4.2.2.4 Determinação das tensões e deformações no ensaio *hollow cylinder*

Como apresentado anteriormente, o equipamento *hollow cylinder torsional* é o único equipamento de ensaio de laboratório capaz de controlar a direção e a magnitude das tensões principais maior (σ_1) e menor (σ_3) e a magnitude da tensão principal intermediária (σ_2).

No corpo de prova são aplicados: carga axial, torque e pressões de confinamento interna e externa. As células de carga medem a carga axial e o torque e os transdutores de deslocamento medem os deslocamentos axial e circunferencial. A partir destas medidas é possível calcular: as tensões axial (σ_z), circunferencial (σ_θ), radial (σ_r) e cisalhante ($\tau_{\theta z}$) e as deformações axial (ϵ) e cisalhante (γ). A Figura 2.5 apresenta a distribuição das referidas tensões no corpo de prova. A seguir é apresentada a formulação para definir o estado de tensões e deformações no equipamento de ensaios *hollow cylinder torsional* desenvolvido nesta tese.

A tensão desvio no corpo de prova é determinada por:

$$\sigma_d = \frac{F}{\pi(r_e^2 - r_i^2)} \quad (4.9)$$

A tensão axial é determinada por:

$$\sigma_z = \frac{F}{\pi(r_e^2 - r_i^2)} + \frac{(p_e r_e^2 - p_i r_i^2)}{(r_e^2 - r_i^2)} \quad (4.10)$$

A primeira parcela desta equação corresponde à tensão desvio e, no caso das pressões interna e externa serem iguais, a segunda parcela fica igual à pressão confinante, então tem-se:

$$\sigma_z = \sigma_d + p_c \quad (4.11)$$

Nos ensaios *hollow cylinder torsional* a tensão principal intermediária é igual à tensão radial, que é determinada por:

$$\sigma_2 = \sigma_r = \frac{(p_e r_e + p_i r_i)}{(r_e + r_i)} \quad (4.12)$$

A tensão circunferencial é determinada por:

$$\sigma_\theta = \frac{(p_e r_e - p_i r_i)}{(r_e - r_i)} \quad (4.13)$$

Então, no caso de $p_e = p_i$, tem-se:

$$\sigma_2 = \sigma_r = \sigma_\theta = p_c$$

A tensão cisalhante é determinada por:

$$\tau_{\theta z} = \frac{3T}{2\pi(r_e^3 - r_i^3)} \quad (4.14)$$

A deformação axial é determinada por:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h} \quad (4.15)$$

A deformação cisalhante é determinada por:

$$\gamma = \frac{2\theta(r_e^3 - r_i^3)}{3h(r_e^2 - r_i^2)} \quad (4.16)$$

onde:

F = carga medida pela célula de carga axial;

p_e = pressão externa;

p_i = pressão interna;

p_c = pressão confinante;

T = torque

h = altura do corpo de prova

θ = ângulo do deslocamento circunferencial do corpo de prova;

r_e = raio externo do corpo de prova;

r_i = raio interno do corpo de prova.

As deformações circunferencial e radial não podem ser determinadas nos ensaios do programa experimental desta tese, pois ainda não há, instalada neste equipamento, instrumentação para medir o deslocamento radial das paredes do corpo de prova durante o ensaio *hollow cylinder*. O desenvolvimento desta instrumentação será uma etapa posterior da pesquisa na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

As tensões envolvidas neste ensaio podem ser ilustradas pelo círculo de Mohr. A Figura 4.20 apresenta, além das tensões calculadas pelas fórmulas acima, as tensões σ_1 e σ_3 e o ângulo α (ângulo formado entre a direção da tensão principal maior com a vertical). Os valores de σ_1 e σ_3 e α podem ser definidos pela formulação apresentada a seguir:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{\theta z}^2} \quad (4.17)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{\theta z}^2} \quad (4.18)$$

$$\alpha = 0,5 \tan^{-1} \left(\frac{2\tau_{\theta z}}{\sigma_z - \sigma_{\theta}} \right) \quad (4.19)$$

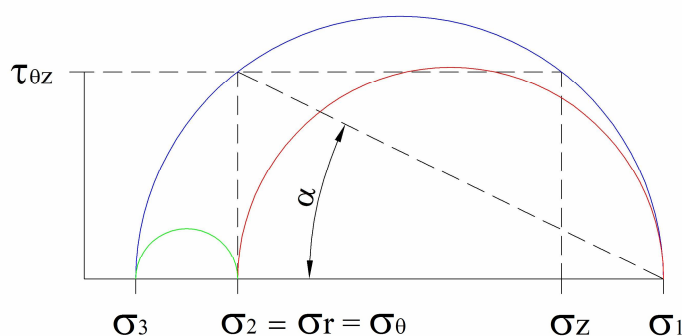


Figura 4.20 – Estado de tensões em um corpo de prova *hollow cylinder torsional* representado círculo de Mohr.

4.2.2.5 Procedimento de ensaio *hollow cylinder*

Com o corpo de prova pronto para iniciar o ensaio *hollow cylinder*, os tubos de drenagem são fixados aos engates rápidos do pedestal e do cabeçote do corpo de prova. O tubo de acrílico, que durante a montagem está suspenso sobre o equipamento, é posicionado na câmara triaxial com o auxílio da talha. A vedação da câmara se dá através da fixação das placas de alumínio no topo do equipamento, que promovem o aperto do tubo contra o anel *O-ring* alojado na placa circular da base, conforme descrito no Capítulo 3.

O quadro de pressões de ar deve ser minuciosamente inspecionado antes da abertura da válvula responsável pela aplicação de ar comprimido no sistema. A seqüência de aplicação de pressões segue a seguinte ordem: pressão confinante, pressão axial e pressão para aplicação do torque. Uma pequena parcela da pressão de suporte ao conjunto de aplicação do torque, deve ser aplicada no cilindro *Bellofram* auxiliar antes da aplicação da carga axial. Como a aplicação desta pressão de ar não é monitorada por um transdutor, é muito difícil precisar pelo manômetro seu exato valor, portanto aplica-se uma pequena quantidade, de modo que não influencie na leitura do deslocamento vertical do corpo de prova, e mesmo assim forneça o suporte necessário à placa de alumínio intermediária.

Antes da realização dos ensaios *hollow cylinder* em corpos de prova de solo, foram realizados ensaios no corpo de prova teste, confeccionado em nylon, para avaliar o

funcionamento do equipamento. Nesta etapa ainda não havia uma metodologia de ensaio definida, portanto a descrição destes ensaios é apresentada com mais detalhes no item 5.2.1, juntamente com os seus resultados. Um dos objetivos, ao realizar os ensaios no corpo de prova teste foi estipular a relação entre a tensão desvio (σ_d) versus a pressão axial (p_z), para que fosse conhecido o estado de tensões aplicado no corpo de prova durante o ensaio. A Figura 4.21 apresenta um gráfico das tensões desvio, medidas no topo do corpo de prova, versus as pressões de ar, aplicadas no cilindro *Bellofram* da base do equipamento, em um ensaio no corpo de prova teste. Nesta figura há uma equação linear que se ajusta bem para valores de pressão axial acima de 20 kPa; valores abaixo desta pressão possuem uma maior sensibilidade à mobilização inicial do sistema, apesar de serem medidos pela célula de carga axial. Através deste ajuste, foi possível estimar qual a pressão de ar que deveria ser aplicada no ensaio para obter-se a tensão desvio desejada. Ao longo da realização dos ensaios *hollow cylinder* com carregamento estático em solo, foi observado que esta equação de ajuste sofre algumas variações, que podem ser atribuídas: (i) às variações da aplicação da pressão de ar durante o ensaio; (ii) a um possível vazamento de ar entre a válvula reguladora de pressão de ar e a entrada do cilindro *Bellofram* ou, (iii) à existência de uma folga no ajuste entre o pistão de carga axial e a esfera no topo do corpo de prova. A Figura 4.22 mostra as retas de ajuste dos resultados de tensão desvio versus pressão de ar obtidas nos ensaios no corpo de prova teste e em solo, ambos identificados na legenda desta figura. A reta, cuja equação de ajuste é apresentada no mesmo gráfico, corresponde à média destes valores. Cabe salientar que, na interpretação dos resultados dos ensaios *hollow cylinder* (apresentada no Capítulo 5), o valor considerado para os cálculos das tensões é o medido pela célula de carga axial durante o ensaio, independente das variações que possam ocorrer na aplicação da pressão de ar.

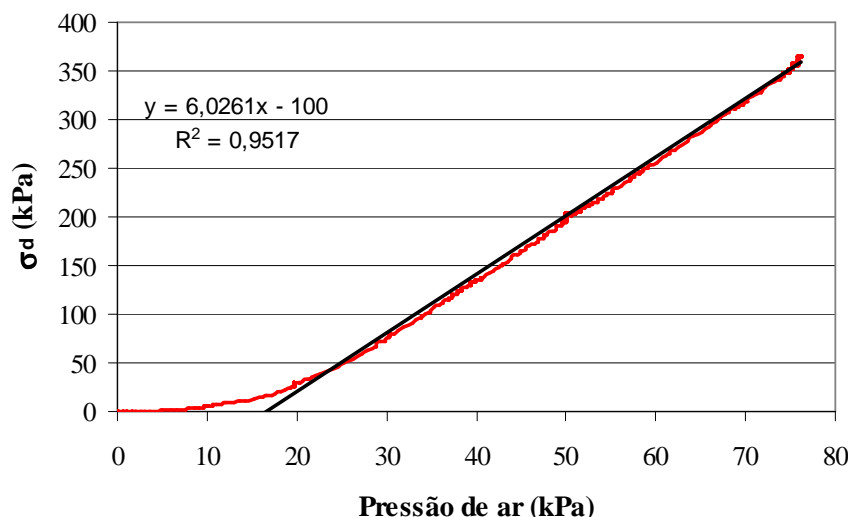


Figura 4.21 – Gráfico da pressão de ar aplicada no cilindro *Bellofram* da carga axial versus a tensão desvio obtida em ensaio *hollow cylinder* no corpo de prova teste.

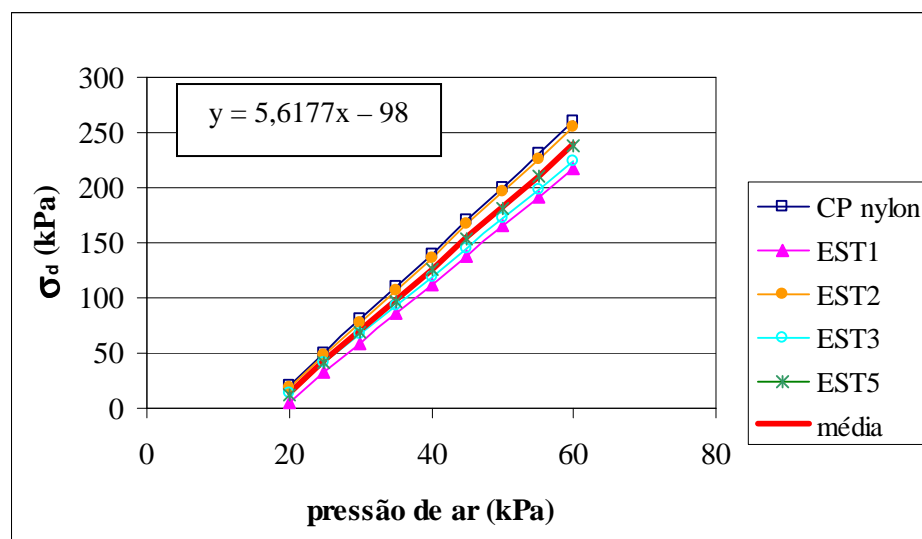


Figura 4.22 – Gráfico da pressão de ar no cilindro *Bellofram* da carga axial versus a tensão desvio obtida nos ensaios *hollow cylinder* realizados no corpo de prova teste e em corpos de prova de solo, com reta de ajuste da média dos resultados.

Todos os ensaios foram realizados com incrementos de tensão desvio sucessivos, espaçados por um determinado período de tempo. Este procedimento é intitulado de carregamento em multi-estágios e tem como objetivo avaliar diferentes estados de tensão em um mesmo corpo de prova. O critério utilizado para definir o intervalo de tempo da aplicação de um novo acréscimo de carga foi a estabilização de tensões e deformações, de modo que

cada estado de tensões formasse um patamar nos gráficos de apresentação dos resultados dos ensaios *hollow cylinder*. Os ensaios estáticos foram de curta duração, então o período de cada incremento de tensão desvio foi determinado durante o ensaio, através da observação da resposta das células de carga e dos transdutores de deslocamento, na tela de saída do programa de aquisição de dados. Os períodos de incremento dos ensaios cíclicos foram definidos de acordo com o objetivo de cada ensaio e serão apresentados em detalhes no Capítulo 5.

O torque estático pode ser aplicado no sentido horário, anti-horário ou em ambos, no caso de ensaios com torque bi-direcional. Para executar ensaios nesta modalidade é necessário cessar a aplicação de torque em um dos cilindros *Bellofram* pequenos e iniciar a aplicação no outro, assim o sentido de rotação do eixo do equipamento *hollow cylinder* é invertido.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Ensaio triaxiais de carregamento repetido

A seguir serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios triaxiais de módulo de resiliência e deformações permanentes, realizados nos corpos de prova do solo residual de arenito Botucatu.

5.1.1 Determinação do módulo de resiliência

Segundo a metodologia indicada no item 3.5.2, foi realizado um ensaio triaxial de carga repetida para determinação do módulo de resiliência do solo residual de arenito Botucatu compactado na energia Proctor normal. Por se tratar de um material predominantemente granular, foram aplicados os pares de pressão confinante (σ_c) e tensão desvio (σ_d) indicados pelo método de ensaio DNER – ME 131/94, para solos arenosos. Após o ensaio, no mesmo corpo de prova, foram aplicados também os pares de tensões indicado por este método, para solos argilosos e siltosos. Apesar de ser um material predominantemente granular, é possível que o elevado teor de finos influencie no seu comportamento, fazendo com que este material apresente um comportamento geotécnico transitório, como verificado na bibliografia (Martins, 2001; Rollo, 2003).

5.1.1.1 Modelos de ajuste propostos pelo método de ensaio DNER – ME 131/94

Os resultados do ensaio são ilustrados pelas Figuras 5.1 e 5.2, através dos gráficos que apresentam os ajustes propostos por este método, para solos arenosos e argilosos e siltosos respectivamente. Através das Equações 3.3, 3.6 e 3.7, derivadas destes ajustes, é possível calcular os valores de módulo de resiliência deste solo, em função do seu estado de tensões. A Tabela 5.1 apresenta os parâmetros k_1 , k_2 , k_3 , e k_4 , determinados pelos seus respectivos modelos, bem como as equações que os representam.

Como base na Figura 5.2 pode-se observar a influência da tensão desvio nos valores do módulo de resiliência, confirmando a hipótese que este solo não apresenta um comportamento tipicamente granular, onde, segundo o modelo proposto, o módulo de resiliência seria função apenas da pressão confinante.

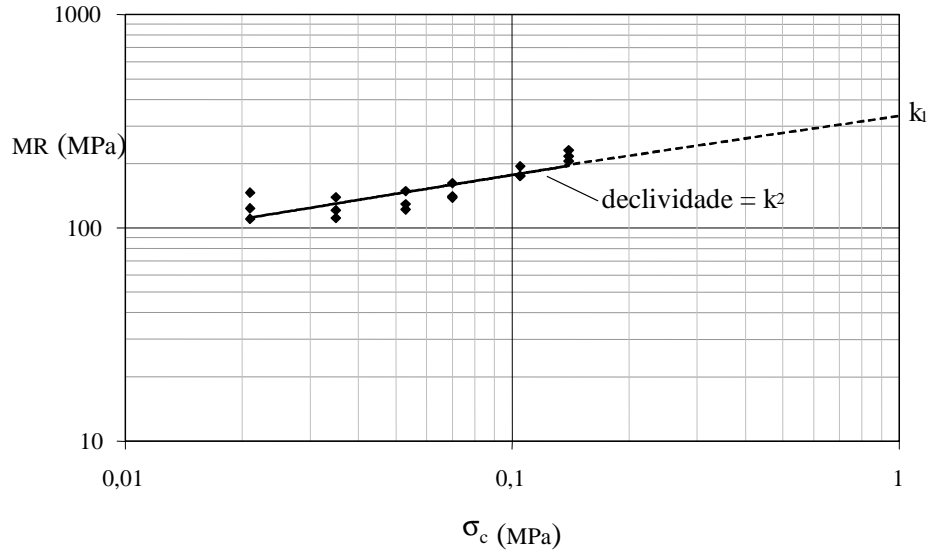


Figura 5.1 – Módulo de resiliência em função da pressão confinante, com ajuste para solos arenosos (DNER – ME 131/94).

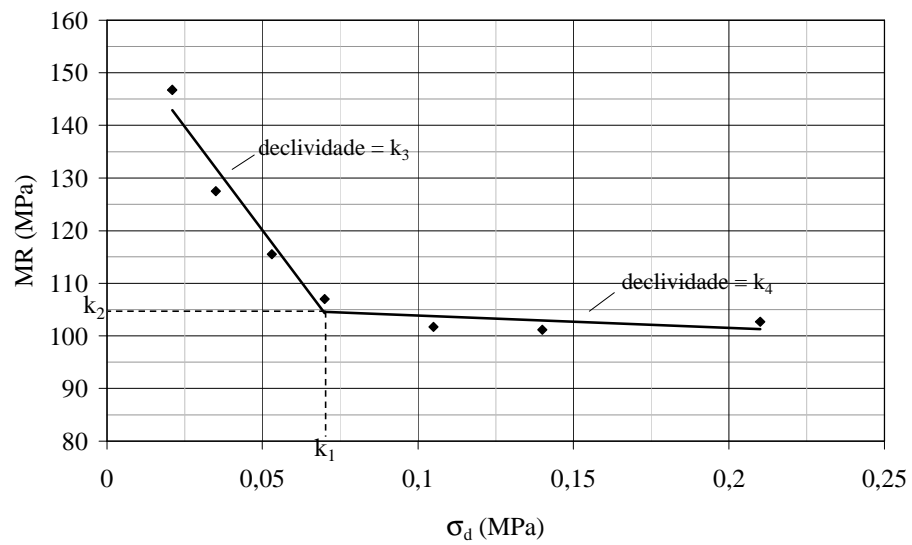


Figura 5.2 - Módulo de resiliência em função da tensão desvio, com ajuste para solos argilosos e siltosos (DNER – ME 131/94).

Tabela 5.1 – Equações para determinação do módulo de resiliência de acordo com os modelos propostos pelo método de ensaio DNER – ME 131/94.

Modelo	Equação de ajuste	Coefficientes
Solos arenosos	$MR = 347,9 \cdot \sigma_c^{0,294}$ (MPa)	$k_1 = 347,9$
		$k_2 = 0,294$
Solos argilosos e siltosos	$MR = 104 + 786 \cdot (0,07 - \sigma_d)$ (MPa) $k_1 > \sigma_d$	$k_1 = 0,07$
		$k_2 = 104$
	$MR = 104 + 23,5 \cdot (\sigma_d - 0,07)$ (MPa) $k_1 < \sigma_d$	$k_3 = 786$
		$k_4 = 23,5$

5.1.1.2 Modelo de ajuste composto para determinação do módulo de resiliência

Modelos compostos, onde o módulo de resiliência é dependente da tensão desvio e da pressão confinante, vêm sendo cada vez mais utilizados e têm-se apresentado mais adequados para determinação do comportamento resiliente dos solos (Ferreira e Motta, 2002). Com o objetivo de estabelecer um modelo composto para este solo, foi realizada uma regressão estatística de múltiplas variáveis. Para esta análise foi utilizado o *software STATISTICA*, desenvolvido pela empresa *StatSoft Inc.* (www.statsoft.com).

Para compor este modelo foram utilizados os valores de σ_c e σ_d empregados no ensaio triaxial de carga repetida, segundo a metodologia para solos arenosos preconizada pelo método de ensaio DNER – ME 131/94, e os respectivos valores de módulo de resiliência encontrados. A equação de ajuste gerada pelo modelo composto apresentou um coeficiente de determinação (R^2) satisfatório, superior ao encontrado no ajuste apresentado na Figura 5.1. A Equação 5.1 representa o modelo de ajuste composto determinado pelo *software STATISTICA*, para determinação do módulo de resiliência (MR) em MPa. A Figura 5.3 apresenta o gráfico tridimensional gerado por este *software*, onde são plotados os conjuntos de valores σ_c , σ_d e MR que deram origem ao modelo composto apresentado.

$$MR = 426 \cdot \sigma_c^{0,473} \cdot \sigma_d^{-0,136} \quad (5.1)$$

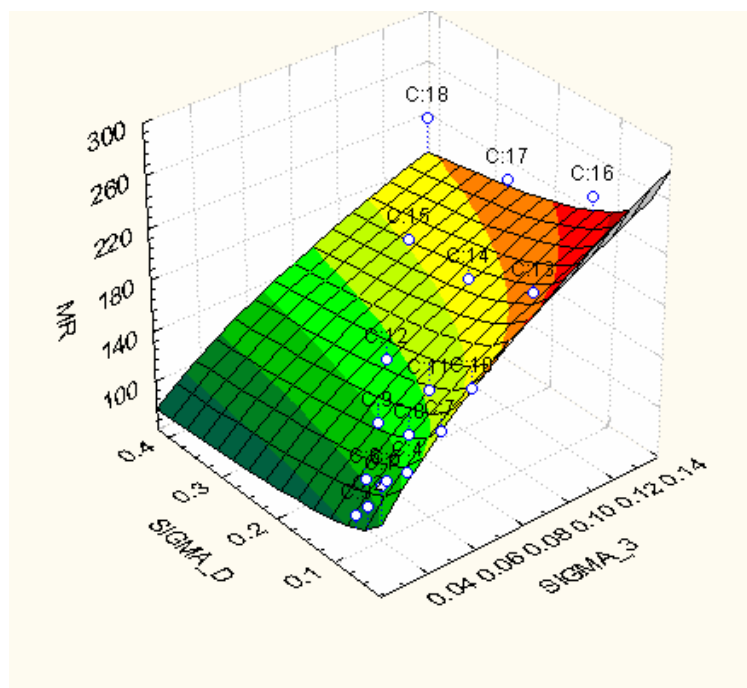


Figura 5.3 – Modelo tridimensional do módulo de resiliência em função da pressão confinante e da tensão desvio, gerado pelo *software* STATISTICA.

5.1.1.3 Comparação com os valores encontrados na literatura

Preussler (1983) e Núñez (1991) realizaram ensaios triaxiais de carga repetida para determinação do módulo de resiliência de solos residuais de arenito Botucatu. A Figura 5.4 apresenta os ajustes do módulo de resiliência em função da pressão confinante apresentados pelos autores segundo a equação 3.3, e o ajuste encontrado nesta tese. Na legenda desta figura, a letra N ou I ao lado de cada autor correspondem à energia de compactação empregada na moldagem do corpo de prova, normal ou intermediária, respectivamente. Para que todas as equações de ajuste estivessem expressas na mesma unidade, os módulos de resiliência foram calculados, transformados para MPa e, então, os parâmetros k_1 e k_2 foram redefinidos. As equações de ajuste de cada curva estão apresentadas na Tabela 5.2. No gráfico da Figura 5.4 pode-se observar que os módulos de resiliência encontrados por Núñez (1991) são bastante coerentes com aqueles encontrados nesta tese, porém os módulos determinados por Preussler (1983) apresentam uma curva de ajuste com inclinação elevada, e valores de módulo altos para pressões confinantes maiores. Cabe salientar que o material utilizado por Preussler (1983) possuía características bem diferentes (granulometria, grau de compactação, limites de Atterberg), além de ter sido coletado em outro local de amostragem.

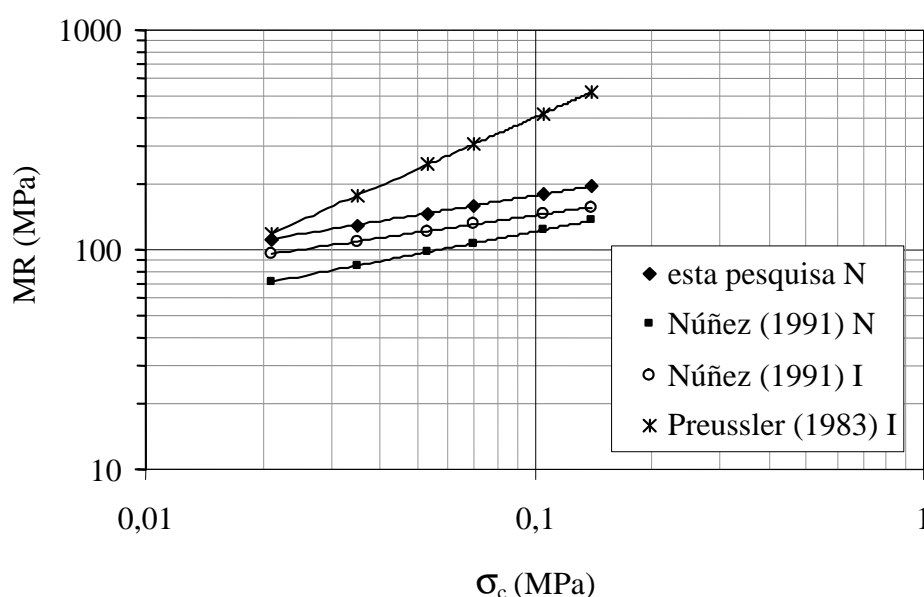


Figura 5.4 – Módulos de resiliência, segundo o ajuste para solos arenosos do método proposto pelo DNER, apresentados por diferentes autores.

Tabela 5.2 – Parâmetros dos modelos de ajuste apresentados na Figura 5.4.

Autor	Parâmetros do modelo $MR = k_1 \sigma_c^{k_2}$ (MPa)		Energia de compactação
	k_1	k_2	
Preussler (1983)	2415,7	0,78	intermediária
Núñez (1991)	265,0	0,34	normal
	261,2	0,26	intermediária
Esta pesquisa	347,9	0,29	normal

5.1.2 Resistência a deformações permanentes

Os valores de ε_{pi} (deformação permanente inicial) e TDP (taxa de deformação permanente) foram determinados de acordo com a metodologia apresentada no item 3.5.3, para cada estado de tensões ensaiado (Tabela 5.3). A Figura 5.5 apresenta o gráfico de deformação permanente versus número de aplicações cíclicas de carga, para os três ensaios triaxiais de carga repetida realizados. Cada curva corresponde a uma pressão confinante (21, 35 e 53 kPa), e cada patamar corresponde a um incremento de tensão desvio diferente.

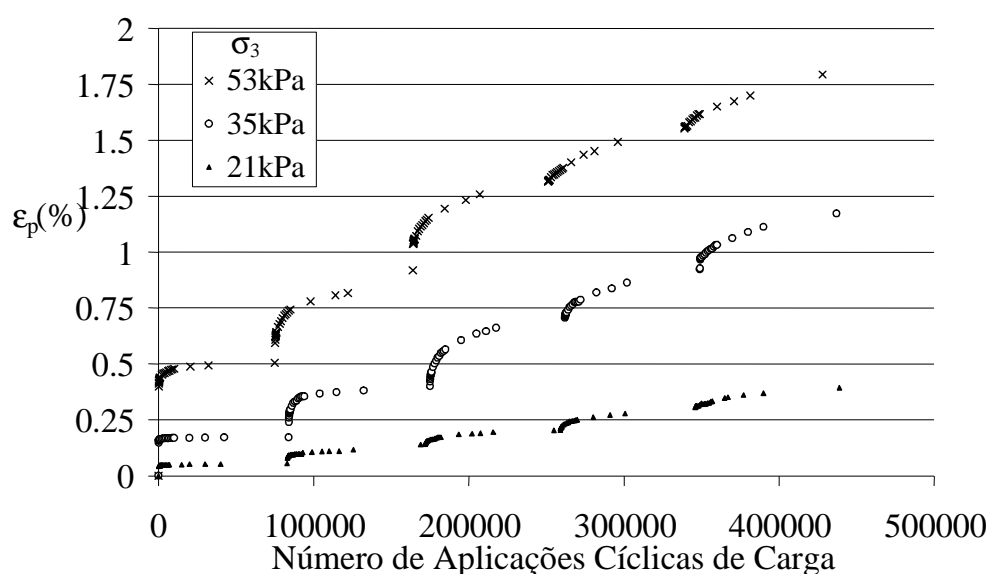


Figura 5.5 – Evolução da deformação permanente com o número de aplicações de carga para três níveis de pressão confinante.

Tabela 5.3 - Parâmetros do modelo de deformações permanentes.

σ_c (kPa)	σ_d (kPa)	ϵ_{pi} (%)	<i>TDP</i> (%/ciclo)
21	21	0,05026	$6,633 \cdot 10^{-8}$
	42	0,09702	$4,932 \cdot 10^{-7}$
	63	0,1799	$2,916 \cdot 10^{-7}$
	84	0,2536	$5,952 \cdot 10^{-7}$
	105	0,3472	$5,118 \cdot 10^{-7}$
35	35	0,1678	$6,360 \cdot 10^{-8}$
	70	0,3540	$5,321 \cdot 10^{-7}$
	105	0,6026	$1,203 \cdot 10^{-6}$
	140	0,8133	$1,267 \cdot 10^{-6}$
	175	1,061	$1,267 \cdot 10^{-6}$
53	53	0,4782	$3,743 \cdot 10^{-7}$
	106	0,7229	$2,166 \cdot 10^{-6}$
	159	1,171	$1,717 \cdot 10^{-6}$
	212	1,417	$1,659 \cdot 10^{-6}$
	265	1,599	$2,224 \cdot 10^{-6}$

Analisando os dados da Tabela 5.3, pode-se verificar que, para todas as pressões confinantes, o valor de ε_{pi} cresce a cada incremento de σ_d , como era esperado. A Figura 5.6 apresenta um gráfico que ilustra a relação ε_{pi} versus σ_d , para cada σ_c aplicado, onde pode ser observado que esta relação apresenta um comportamento linear. O valor de TDP não apresenta uma tendência de comportamento definida. É possível que uma investigação mais detalhada, incluindo estudos de microscopia eletrônica, possam explicar estas variações, que possivelmente estejam associadas a diferentes micro-estruturas geradas pelos mecanismos de deformação de materiais granulares e pela história de tensões imposta por cada estágio do ensaio. Em uma análise preliminar, observando a Figura 5.7, há uma tendência de estabilização da TDP com o acréscimo de σ_d , que pode estar relacionada à densificação do corpo de prova provocada pela história de tensões imposta. Para $\sigma_c = 53$ kPa, os valores de TDP podem ter sido influenciados por uma possível quebra de partículas, pois neste ensaio são aplicados valores de σ_d altos nos estágios finais. Estas tensões mais altas somente foram suportadas pelo material porque houve uma densificação gradual a cada estágio anterior de incremento de σ_d , possivelmente um corpo de prova virgem romperia nestas condições.

As deformações permanentes de materiais granulares estão diretamente relacionadas à história de tensões sofrida por este solo. A deformação permanente resultante de um sucessivo acréscimo do nível de tensões é consideravelmente menor que a deformação que ocorre quando este mesmo nível de tensões é aplicado diretamente sobre o corpo de prova. Quando o carregamento repetido é aplicado, o efeito da história de tensões aparece como resultado de um gradual enrijecimento do material, a cada novo ciclo de carga aplicado, causando uma redução na proporção entre as deformações permanente e resiliente, durante as próximas aplicações de ciclo de carga. Apesar do efeito da história de tensões nas deformações permanentes ser reconhecido, há poucos relatos de pesquisas no assunto (Lekarp *et al.*, 2000b).

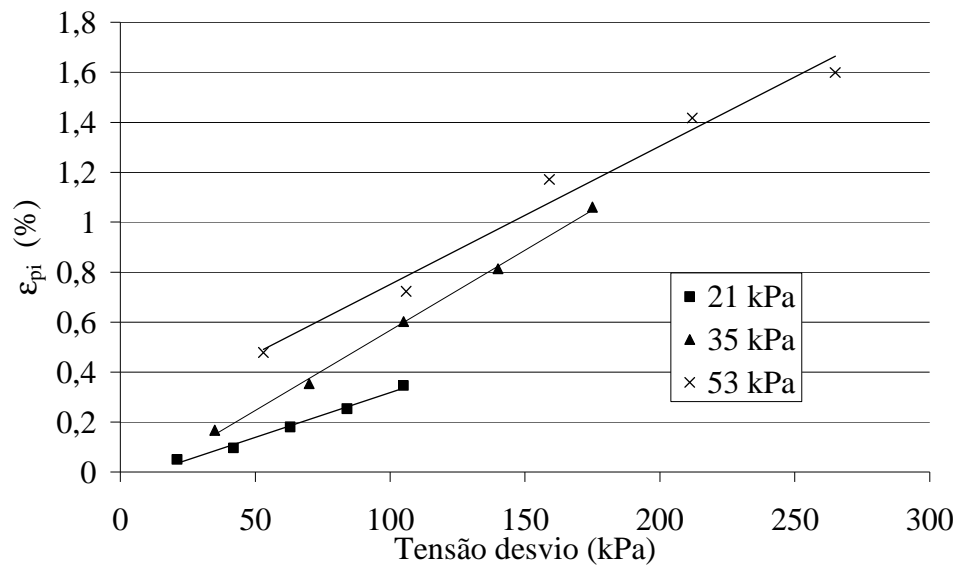


Figura 5.6 – Valores de ε_{pi} em função de σ_d para cada σ_3 aplicado.

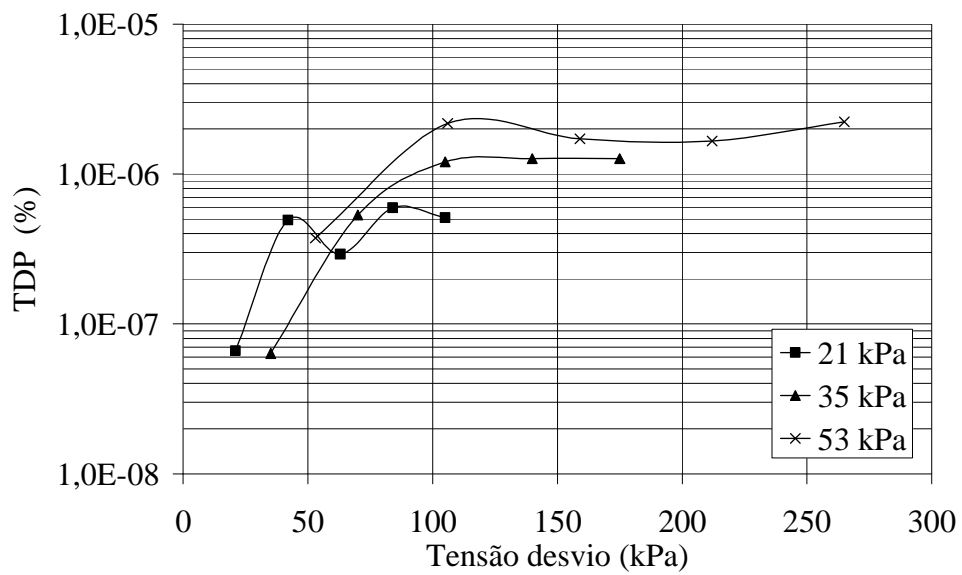


Figura 5.7 – Valores de TDP em função de σ_d para cada σ_3 aplicado.

5.2 Ensaaios *hollow cylinder torsional*

Foram realizados ensaios *hollow cylinder torsional* com carregamento estático e cíclico e torque estático, no corpo de prova teste e no solo residual de arenito Botucatu compactado. A seguir são apresentados e analisados os resultados obtidos. Cabe enfatizar que todos os resultados são considerados neste trabalho, até mesmo aqueles que não são significativos para avaliar o comportamento geotécnico do solo, pois fazem parte da implementação do equipamento e contribuem para o entendimento do funcionamento do mesmo.

5.2.1 Ensaaios no corpo de prova teste

Os primeiros ensaios foram realizados com o corpo de prova teste, confeccionado em nylon com o formato e as dimensões do corpo de prova em solo que é utilizado no equipamento *hollow cylinder torsional* projetado. Estes ensaios objetivaram testar a instrumentação e o sistema pneumático de aplicação de cargas, bem como o funcionamento geral do equipamento. Nesta fase foi possível identificar algumas limitações e peculiaridades do equipamento, decorrentes em parte da sua concepção e montagem, e adaptar o programa experimental de ensaios em solo à sua capacidade e potencialidade.

5.2.1.1 Ensaaios estáticos

Foi realizado um ensaio com carregamento axial estático e aplicação de torque, também estático no corpo de prova teste. A seqüência de aplicação de pressões apresentada na Tabela 5.4. A Figura 5.8 apresenta um gráfico com as três pressões de ar aplicadas: (i) pressão externa e interna ao corpo de prova (p_c); (ii) pressão axial (p_a); e (iii) pressão responsável por promover o torque no corpo de prova (p_t). Além das pressões aplicadas, este gráfico também apresenta os deslocamentos medidos no transdutor de deslocamento axial (Δh) e no transdutor de deslocamento circunferencial ($\Delta\theta$), descritos no item 3.4.2. Ambas as medidas, pressão e deslocamento, foram plotadas versus o tempo em segundos, no eixo das abscissas.

Além da resposta do equipamento à aplicação das pressões de ar comprimido na câmara e nos cilindros *bellofrans*, outra verificação importante foi em relação ao funcionamento das células de carga, sua sensibilidade à aplicação das cargas e pressões que fazem parte do sistema. Como descrito no Capítulo 3, três células de carga foram instaladas no topo do

equipamento: uma com capacidade de 1000 kg, que mede o carregamento axial, e as outras duas com capacidade de 100 kg, dispostas paralelamente, para medir a força de reação ao torque, imposto pelo giro aplicado na base do equipamento. Pode-se dizer que a célula de carga que mede o carregamento axial é indiferente à aplicação da pressão confinante e do torque. Um pequeno ruído foi observado nas leituras da célula durante a realização do ensaio, porém ao analisar os resultados, percebe-se que esta influência é desprezível.

De maneira análoga, o transdutor de deslocamento que mede o deslocamento axial do corpo de prova, também apresenta boa resposta. No momento da aplicação da pressão confinante e do torque, alguma influência pode ser observada na tela do programa de aquisição de dados, porém ao observar a curva do deslocamento axial do corpo de prova, após a realização do ensaio, esta influência torna-se desprezível (ver Figura 5.8). A Figura 5.9 mostra o gráfico da tensão desvio (σ_d), tensão axial (σ_z) e deslocamento axial versus o tempo. As tensões foram calculadas pelas Equações 4.9 e 4.11, e o deslocamento corresponde à leitura do transdutor de deslocamento axial.

Ao contrário da instrumentação para medição do carregamento axial, o sistema desenvolvido para medir o torque, sofre bastante influência da aplicação das outras pressões. A Figura 3.21, mostra em detalhes como as células de carga são dispostas. Inicialmente, acreditava-se que os pistões de torque deveriam estar encostados nas placas fixadas às células de carga. Foi constatado que antes da aplicação do torque, as células de carga reagiram à aplicação da pressão confinante e principalmente à pressão de ar axial, quanto maior era o carregamento axial maior era a leitura nas células de torque. Planejou-se então, descontar as leituras que antecediam à aplicação do torque, para que fosse obtida apenas a medida de carregamento correspondente a esta solicitação. Outra constatação neste ensaio, foi a importância do ajuste da posição dos pistões em relação às células de carga. Teoricamente, os pistões devem estar exatamente perpendiculares às células de carga que, por sua vez, devem estar paralelas entre si. Quanto maior o erro neste ajuste maior será a diferença da leitura nas células de carga.

O transdutor de deslocamento instalado paralelo à base do equipamento, para medir o giro do corpo de prova, não pôde ser avaliado neste ensaio, pois o corpo de prova teste praticamente não permite a deformação circunferencial. A Figura 5.8 mostra que este transdutor de deslocamento apresenta uma pequena variação no início da aplicação das pressões, mas logo estabiliza suas leituras.

Tabela 5.4 – Pressões aplicadas no ensaio estático do corpo de prova teste.

Pressão confinante p_c (kPa)	Pressão axial P_a (kPa)	Pressão de torque p_t (kPa)
20	50	30
30	50	30
	75	30
20	75	30

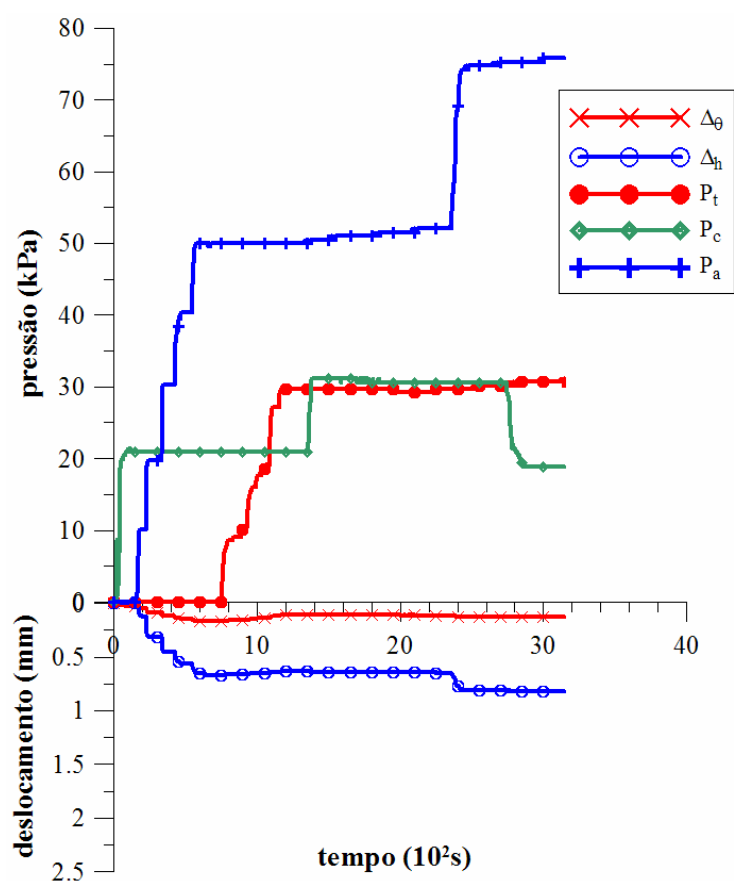


Figura 5.8 – Gráfico das pressões aplicadas no ensaio e deslocamentos medidos versus o tempo. Corpo de prova teste, ensaio estático.

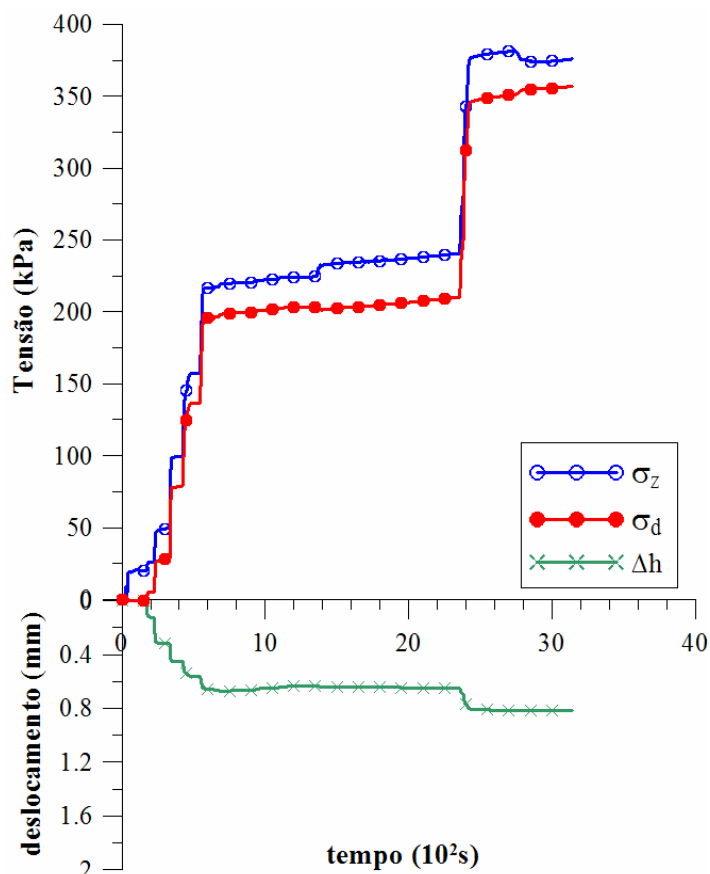


Figura 5.9 – Gráfico da tensão desvio, tensão axial e deslocamento axial versus tempo; corpo de prova teste, ensaio estático.

5.2.1.2 Ensaios cíclicos

O principal objetivo destes ensaios foi testar o sistema de aplicação de cargas cíclicas (temporizador, válvula solenóide, etc) e verificar as respostas obtidas pela instrumentação. Foi utilizada uma frequência de aquisição de dados de 200 Hz, que é a frequência indicada pela norma americana AASHTO TP46-94 (1996) para a medição de deslocamentos cíclicos no ensaio triaxial de módulo de resiliência. Observou-se que os pulsos de carga apresentaram uma duração próxima a 0,1s, seguidos de 0,9s em repouso, totalizando assim um período de aproximadamente 1 segundo. Esta configuração de carregamento é a mesma utilizada nos ensaios triaxiais de carregamento repetido apresentados neste capítulo. Os pulsos de deslocamento se comportaram de forma análoga e coincidem com os pulsos de carga. A Figura 5.10 apresenta um trecho da aquisição de dados obtido em um ensaio, que ilustra graficamente o comportamento dos pulsos de carga e de deslocamento aplicados no ensaio com carregamento axial cíclico. A tensão desvio (σ_d) apresentada neste gráfico é calculada

pela equação 4.9 a partir das leituras da célula de carga axial, e os deslocamentos axiais são medidos diretamente pelo transdutor de deslocamento. Os resultados dos testes no corpo de prova de nylon mostraram que o sistema de aplicação de cargas e a instrumentação, apresentaram um desempenho adequado à realização dos ensaios com carregamento cíclico.

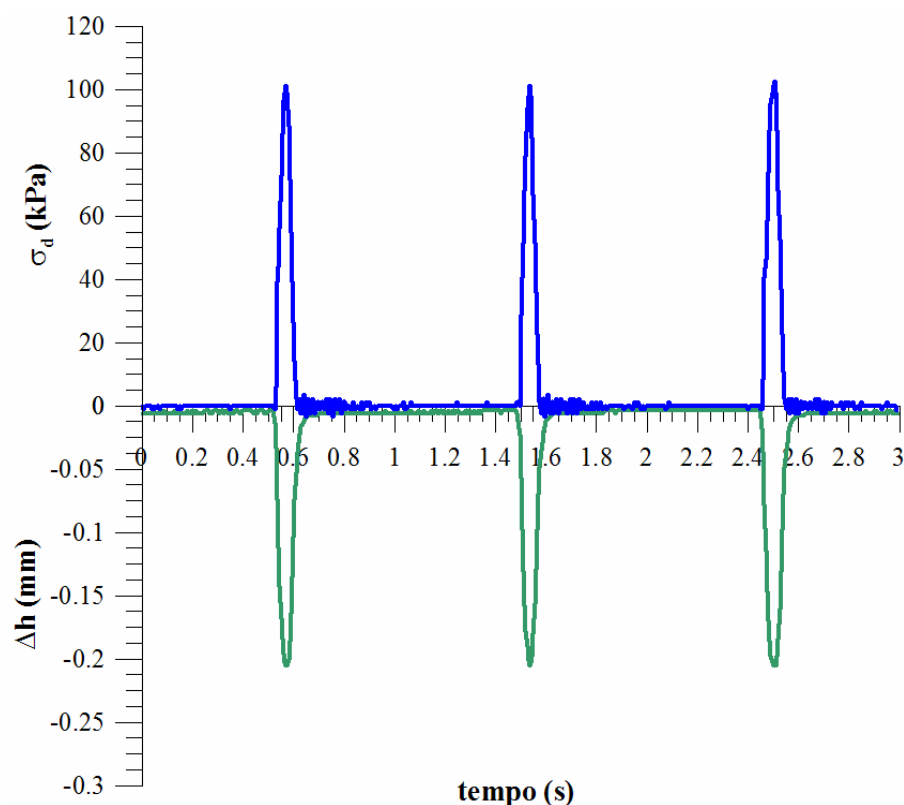


Figura 5.10 – Pulsos de carga e deslocamento versus tempo em ensaio com carregamento cíclico no corpo de prova teste.

5.2.2 Ensaios em solo

A seguir serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios no solo residual de arenito Botucatu compactado. Foram realizados ensaios com aplicação de carregamento axial estático e cíclico, com e sem aplicação de torque estático.

5.2.2.1 Ensaios estáticos

Foram realizados oito ensaios com aplicação de carregamento axial estático, e em seis deles foi aplicado torque, também estático. Os cinco primeiros ensaios (EST1 a EST5) são

considerados preliminares, pois foram importantes para definir peculiaridades e características do equipamento que não foram detectadas nos ensaios no corpo de prova teste. Por consequência, estes ensaios preliminares apresentam apenas resultados parciais. Além de testar o equipamento, o método de moldagem também estava sendo avaliado nos primeiros ensaios. O Quadro 5.1 apresenta um resumo das características de cada ensaio. Nele são apresentados: (i) o peso específico aparente seco do corpo de prova e seu teor de umidade correspondente; (ii) a seqüência de aplicação das pressões nos ensaios; e (iii) uma breve descrição das principais características de cada ensaio. Todos os ensaios foram realizados com carregamento em multi-estágios. Cabe salientar que os valores de pressão indicados no referido quadro são valores aproximados, as leituras obtidas pelas células de carga durante o ensaio é que fornecem dados para o cálculo das tensões, com exceção da pressão confinante, cujo valor equivale diretamente à tensão principal intermediária (σ_2).

O primeiro ensaio realizado (EST1) foi moldado em 5 camadas e apresentou um peso específico muito baixo. O corpo de prova rompeu na câmara durante a aplicação do segundo estágio de tensão desvio. A hipótese inicial foi de que a ruptura se devesse principalmente à baixa densidade do corpo de prova. No entanto, ao realizar o segundo ensaio (EST 2), com um corpo de prova mais denso, a ruptura também ocorreu durante a aplicação do segundo estágio de tensão desvio, com uma tensão um pouco maior. O objetivo destes ensaios de fato era levar os ensaios a ruptura e estimar a relação σ_d/p_c que poderia ser aplicada no corpo de prova. No primeiro ensaio a ruptura ocorreu com uma tensão desvio em torno de 4 vezes a pressão confinante e no segundo, 5,5 vezes a pressão confinante. O torque não foi aplicado nestes ensaios.

No ensaio EST 3 o carregamento axial foi realizado em multi-estágios, e as tensões desvio, correspondentes às pressões de ar apresentadas no Quadro 5.1, foram de 14, 41 e 65 kPa. Este ensaio caracterizou-se pela ocorrência de alguns de imprevistos, como a queda da tensão axial devido ao ligamento do compressor de ar, conforme apresentado no item 4.2.2.3. Neste ensaio também ocorreu um desalinhamento da esfera metálica no topo do corpo de prova com o pistão de carga axial, que só foi percebido quando se aplicou torque no corpo de prova, e serviu de alerta para que fosse tomado mais cuidado na instalação do corpo de prova na câmara. Ao aplicar o torque observou-se, na tela do programa de aquisição de dados, que apenas uma das células de carga foi solicitada. Então, ao examinar o corpo de prova na câmara, foi possível visualizar uma deformação no seu topo. A medição do torque e

interpretação dos seus dados foi inviabilizada por esta falha na montagem do ensaio. Até a aplicação de torque o ensaio transcorreu normalmente como mostra o gráfico da Figura 5.11, que apresenta a tensão desvio e a deformação axial versus o tempo.

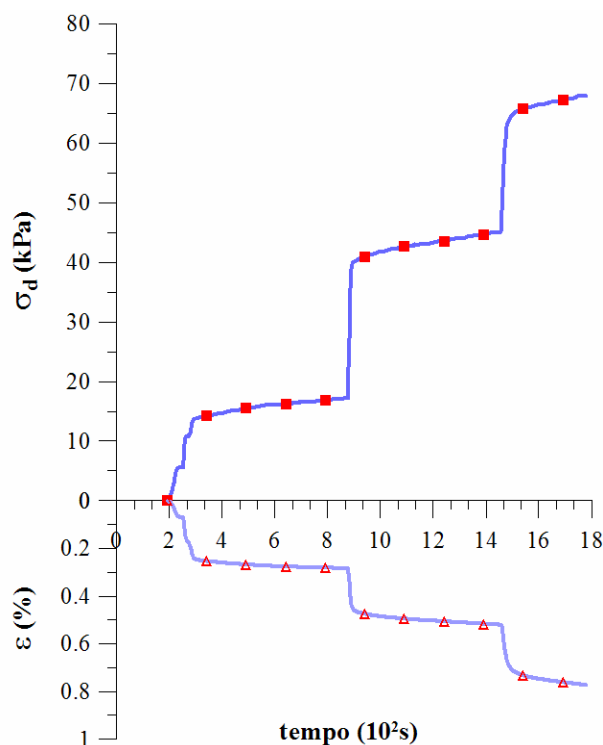


Figura 5.11 – Gráfico tensão desvio (σ_d) e deformação axial (ε) versus tempo do período inicial do ensaio EST 3.

O ensaio EST4 foi realizado com o objetivo de avaliar a resposta do corpo de prova à aplicação do torque, até a sua ruptura. Após a aplicação de um valor de pressão confinante e tensão desvio constante, o torque começou a ser aplicado em estágios. O gráfico da Figura 5.12 mostra as leituras das células de carga de torque, sua respectiva média e a medida de deslocamento circunferencial fornecida pelo transdutor de deslocamento, instalado junto à base do corpo de prova. Neste gráfico estão sinalizados os pontos que representam alguma mudança na condição de ensaio, representados pela reação das células de carga de torque e do transdutor de deslocamento circunferencial. As seguintes considerações são relevantes ao se observar o referido gráfico:

- A princípio, como o sistema de transferência de torque ao corpo de prova aplica um binário de forças nas células de carga, suas respectivas leituras deveriam ser iguais,

porém é muito difícil promover um ajuste simétrico e equidistante dos pistões de torque. Quando as leituras são diferentes, considerar a média de ambas torna-se uma aproximação aceitável. Um controle minucioso da posição dos pistões ao montar o ensaio dentro da câmara diminui consideravelmente esta diferença.

- Ao transcorrer aproximadamente 230 segundos, a carga axial começa ser aplicada e imediatamente é sentida pelas células de carga de torque. Pode-se observar no gráfico como a célula de carga é sensível à aplicação da pressão axial. Após o término da aplicação desta carga as leituras se estabilizam no máximo valor alcançado.
- O torque começou a ser aplicado por volta de 1000 segundos de ensaio (30 kPa de pressão de ar no cilindro *bellofram* da base). As células de carga de torque são solicitadas e o transdutor de deslocamento mede o giro da base do corpo de prova. Aos 1400 segundos um novo incremento de torque é aplicado. Ao transcorrer 1500 segundos, enquanto mais um incremento de torque estava sendo aplicado, ocorreu o ligamento do compressor para equalizar a pressão do tanque de ar comprimido, ocasionando uma queda na leitura da célula de torque número 2. O gráfico do deslocamento circunferencial versus o tempo mostra pequenos patamares que demarcam estes incrementos de torque.
- Durante a aplicação do último incremento de carga ocorreu a ruptura do corpo de prova por cisalhamento. Observa-se que mesmo com a ruptura as células de carga mantêm-se tensionadas por algum tempo, pois o giro ocorre na base do corpo de prova. Nas medidas de deslocamento circunferencial, o ponto de ruptura pode ser claramente visualizado. A ruptura ocorreu com uma deformação cisalhante (γ) de aproximadamente 2 %. A Figura 5.13 apresenta uma fotografia do corpo de prova após o ensaio, onde pode ser observada claramente a superfície de ruptura. Esta superfície atravessa o corpo de prova, do topo à base, no seu sentido circunferencial.

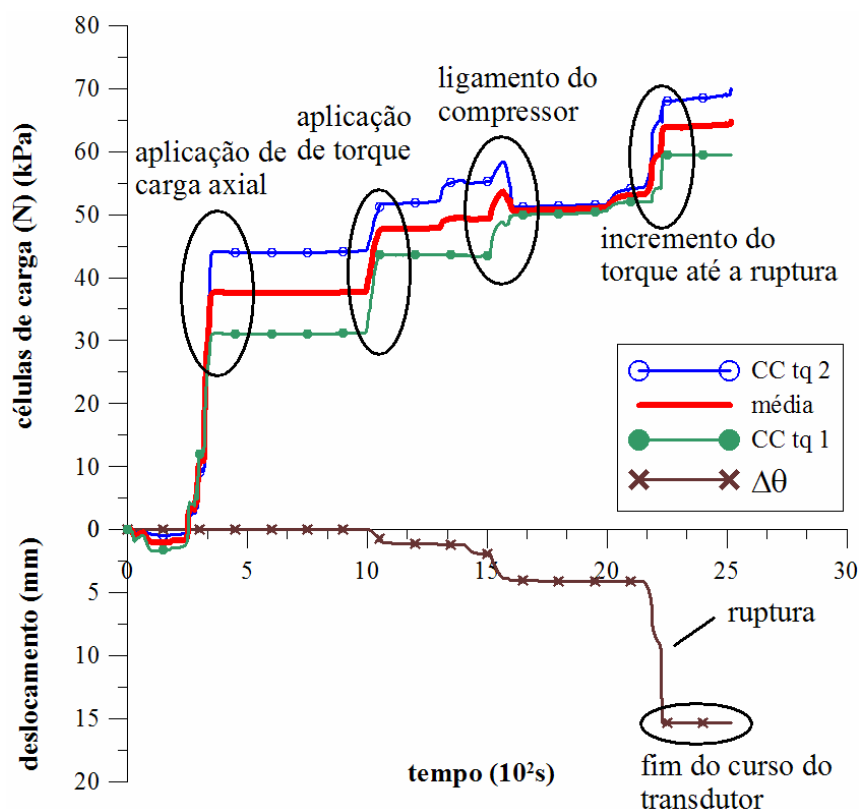


Figura 5.12 – Gráfico das leituras das células de carga de torque (CC tq 2 e CCtq 1) e transdutor de deslocamento circunferencial ($\Delta\theta$) versus o tempo, com indicação das variações no ensaio EST4.

O ensaio EST4 trouxe duas importantes contribuições para realização e interpretação dos ensaios. A primeira delas é quanto à qualidade da moldagem dos corpos de prova. Receava-se que ao aplicar um torque elevado, a ruptura se desse entre as camadas de compactação do corpo de prova. Entretanto, a superfície de ruptura apresentada na Figura 5.13 não deixa dúvidas que o método de moldagem empregado é eficiente. A segunda é quanto à sensibilidade das células de carga de torque à aplicação do carregamento axial. Se a pressão axial se mantivesse constante, não haveria dificuldade em separar a influência de cada solicitação. Porém as quedas de pressão, devidas ao ligamento do compressor de ar, refletem nas células de carga de torque e é muito difícil quantificar a influência da queda no carregamento axial neste ponto.

Quadro 5.1 – Quadro geral das características dos ensaios no equipamento *hollow cylinder torsional* com carregamento axial estático.

Ensaio	Corpo de prova		Seqüência de aplicação de pressões (pc: confinante, pa: axial, pt: torque)	Observações	
	γ_d (kN/m ³)	ω (%)			
preliminares	EST1	14,22	12,0	pc: 30 kPa; pa: 30, 40 kPa (ruptura)	Corpo de prova moldado em 5 camadas (peso específico baixo); ruptura ocorreu durante aplicação de carregamento axial elevado.
	EST2	17,00	10,4	pc: 30 kPa; pa: 30, 47 kPa (ruptura)	Primeiro corpo de prova moldado em 10 camadas; ruptura ocorreu durante aplicação de carregamento axial elevado.
	EST3	17,05	13,8	pc: 30 kPa; pa: 20, 30 kPa; pt: 25, 35, 45 kPa	Ajuste do pistão de carga axial excêntrico, conseqüente deformação do topo do corpo de prova e desalinhamento dos pistões de torque.
	EST4	17,06	13,8	pc: 30 kPa; pa: 30 kPa; pt: 30, 40, 50, 57 kPa (ruptura por torque)	Ensaio para avaliar a aplicação de torque no corpo de prova, torque aumentado até a ruptura.
	EST5	16,61	13,7	pc: 30 kPa; pa: 20, 25, 30 kPa; pc: 50 kPa; pa: 35, 40, 45 kPa; pt: 30, 40, 50, 60, 70 kPa.	Realizado com o compressor desligado, nível de ar comprimido no tanque caiu e pressões cresceram rapidamente no final do ensaio.
EST6	16,74	12,6	pc: 30 kPa; pa: 20, 30 kPa; pc: 50 kPa; pa: 40 kPa; pt: 30, 40, 50, 60 kPa.	Primeiro ensaio com medida de torque correta (pistões desencostados da célula de carga no início do ensaio)	
EST7	16,57	11,1	pc: 30 kPa; pa: 20, 30 kPa; pc: 50 kPa; pa: 40 kPa; pt: 30, 40, 50, 60 kPa (sentido horário) pt: 30, 40, 50, 60 kPa (sentido anti-horário)	Verificação do ensaio anterior, aplicação de torque reverso no final do ensaio.	
EST8	16,50	12,3	pc: 50 kPa; pa: 30 kPa; pt: 30, 40, 50, 60 kPa (sentido horário) pt: 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 kPa (sentido anti-horário) pt: 23, 33 kPa (sentido horário)	Estado de tensão para valores de α maiores e análise do torque reverso	



Figura 5.13 – Superfície de ruptura ocasionada pela aplicação de torque no ensaio EST4.

O ensaio EST5 foi realizado com o compressor de ar desligado. Como o tanque que armazena ar comprimido possui uma capacidade que supri toda a demanda de um ensaio estático de curta duração, optou-se por enchê-lo no início e não realimentá-lo durante o desenvolvimento do ensaio. Normalmente, o compressor é automaticamente ligado quando a pressão de ar dentro do tanque cai para 850 kPa, mas como neste ensaio ele estava desligado, a pressão continuou caindo. Quando a pressão no tanque alcançou uma valor aproximado de 700 kPa, as leituras das células de carga mostraram que a taxa de crescimento das pressões axiais e de torque começou a subir bruscamente em um curto período de tempo, então o compressor de ar foi ligado. Nesta ocasião, não foi mais possível continuar o ensaio, pois os níveis de deformação axial e circunferencial eram elevados, e correspondiam a um estado de tensões que não era desejado. A Figura 5.14 mostra claramente este incremento nas pressões durante o último estágio de pressão axial (45 kPa), através do gráfico: pressões de ar aplicadas no ensaio e deslocamentos medidos versus o tempo. Pode-se observar que a pressão confinante permanece praticamente constante, contribuindo assim para a suposição

apresentada no item 4.2.2.3, sobre a influência da diferença dos modelos das válvulas reguladoras de pressão. No gráfico são sinalizados o trecho em que o compressor de ar foi ligado e o fim de curso do transdutor de deslocamento circunferencial ($\Delta\theta$). O aumento brusco nas pressões axiais influenciou nas leituras das células de carga de torque, inviabilizando assim o cálculo e a avaliação da tensão cisalhante aplicadas no corpo de prova. O deslocamento circunferencial do corpo de prova, apresentado no gráfico da Figura 5.14, resulta em deformações cisalhantes na ordem de 3,5% até o ponto em que foi medido, pois o curso do transdutor de deslocamento acabou antes do final do ensaio. Neste ensaio o corpo de prova não foi levado à ruptura, mas as deformações cisalhantes alcançadas são bem maiores quando comparado ao ensaio EST4. Este resultado era esperado pois a pressão de confinamento e a tensão desvio aplicadas neste ensaio são maiores, portanto a magnitude das tensões cisalhantes, a qual o corpo de prova pode ser submetido, é também maior.

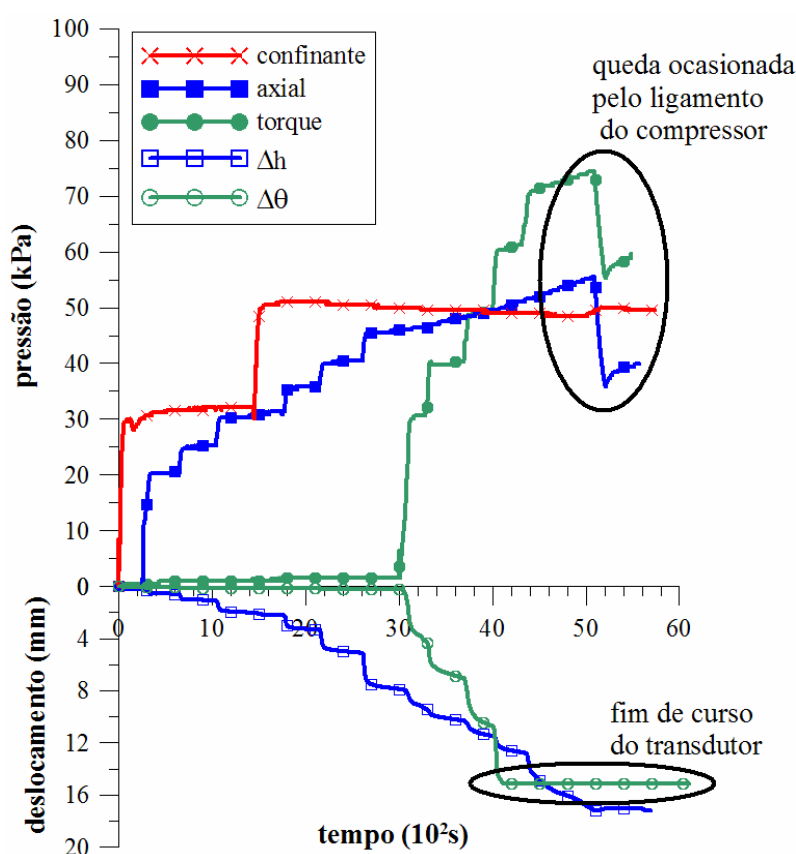


Figura 5.14 – Gráfico das pressões de ar aplicadas no corpo de prova e os deslocamentos axial (Δh) e circunferencial ($\Delta\theta$) versus o tempo, no ensaio EST5.

O ensaio EST5 encerra a fase de ensaios estáticos considerados preliminares. Os ensaios apresentados até o momento contribuíram para o entendimento e domínio do funcionamento do equipamento, mas todos apresentam apenas resultados parciais. A partir do ensaio EST6, apresentado a seguir, os procedimentos de montagem do ensaio e aplicação de cargas garantiram o desenvolvimento adequado do ensaio até o final.

Nos ensaios EST6, EST7 e EST8 os pistões de torque não iniciaram o ensaio encostados nas placas de aço fixadas às células de carga de torque, conseqüentemente o valor medido pelas células de cargas equivale exclusivamente ao binário de forças aplicado para promover o torque. Como pode ser observado no Quadro 5.1, foram aplicados incrementos de pressão confinante e tensão desvio antes de iniciar a aplicação do torque. A Tabela 5.5 apresenta os estados de tensão e deformação, resultantes da aplicação de pressão axial, confinante e torque no corpo de prova no ensaio EST6, através dos seguintes parâmetros: (i) tensões principais maior (σ_1), intermediária (σ_2) e menor (σ_3); (ii) tensão cisalhante ($\tau_{\theta z}$); (iii) deformações axial (ε) e cisalhante (γ); e (iv) ângulo da direção da rotação da tensão principal maior em relação à vertical (α). Enquanto o torque não é aplicado, σ_1 equivale a σ_z e σ_2 é igual a σ_3 . Todos os parâmetros foram calculados pela formulação apresentada no item 4.2.2.4. De maneira análoga, as Tabelas 5.6 e 5.7 apresentam estes parâmetros para os ensaios EST7 e EST8, respectivamente.

Tabela 5.5 – Estados de tensão e deformação aplicados no corpo de prova do ensaio EST6.

σ_z (kPa)	σ_1 (kPa)	σ_2 (kPa)	σ_3 (kPa)	$\tau_{\theta z}$ (kPa)	ε (%)	γ (%)	α (°)
58,60	58,60	30	30	0	0,41	0	0
119,12	119,12	30	30	0	0,96	0	0
140,03	140,03	50	50	0	1,04	0	0
193,24	193,24	50	50	0	2,14	0	0
193,24	194,23	50	49,01	11,93	2,60	0,80	4,73
193,24	194,93	50	48,31	15,67	2,95	1,32	6,17
193,24	195,91	50	47,33	19,15	3,15	1,88	7,71
193,24	196,88	50	46,36	23,12	3,80	3,37	8,95

O gráfico da Figura 5.15 mostra as tensões e deformações apresentadas na Tabela 5.5 versus o tempo, referentes ao ensaio EST6. Como pode ser observado na tabela, a variação de α é pequena, pois o estado de tensões aplicado no corpo de prova restringiu uma rotação das tensões principais maior. Este ensaio não objetivou simular uma condição de campo específica, mas sim verificar a capacidade do equipamento de aplicar a rotação do plano de tensões principais para um estado de tensões aleatório. Para obter uma rotação maior é imprescindível que a diferença entre σ_z e σ_2 seja menor. Antes de iniciar a aplicação do torque são aplicados quatro estágios de incrementos de tensão axial. A tensão cisalhante e a deformação cisalhante começam a se desenvolver a partir do momento em que o torque é aplicado no sentido horário e conseqüentemente as tensões principais σ_1 e σ_3 começam a variar de magnitude. A tensão principal σ_2 foi mantida constante até o final do ensaio. O gráfico da Figura 5.16 apresenta o ângulo α versus a deformação cisalhante. Nota-se que a relação entre estes parâmetros diminui com o aumento da deformação cisalhante.

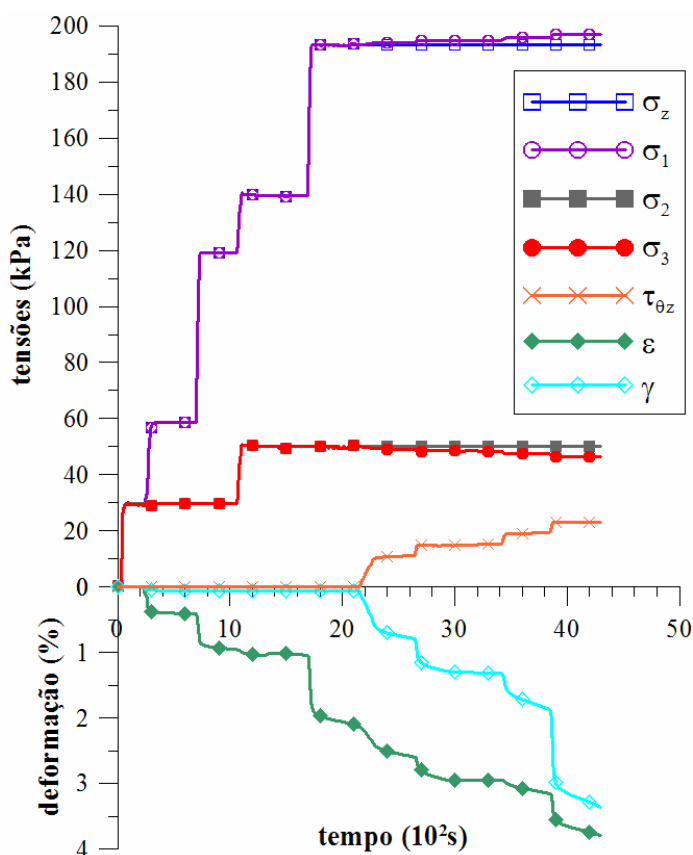


Figura 5.15 – Gráfico das tensões e deformações versus o tempo, aplicadas no ensaio EST6.

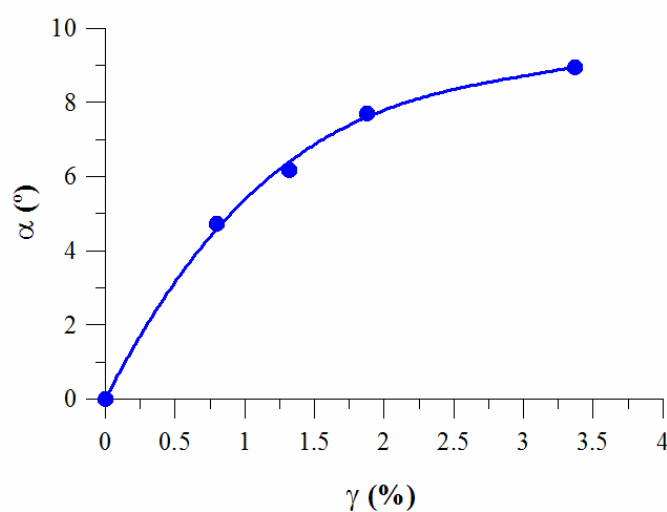


Figura 5.16 – Gráfico da rotação das tensões principais (α) versus a deformação cisalhante no ensaio EST6.

Tabela 5.6 – Estados de tensão e deformação aplicados no corpo de prova do ensaio EST7.

Sentido do torque	σ_z (kPa)	σ_1 (kPa)	σ_2 (kPa)	σ_3 (kPa)	$\tau_{\theta z}$ (kPa)	ϵ (%)	γ (%)	α (°)
horário	70,53	70,53	29,59	29,59	0	0,27	0	0
	112,07	112,07	29,59	29,59	0	0,73	0	0
	134,54	134,54	50,51	50,51	0	0,93	0	0
	187,54	187,54	50,51	50,51	0	2,24	0	0
	187,54	188,36	50,51	49,69	10,61	2,87	1,01	4,40
	187,54	188,99	50,51	49,07	14,14	3,24	1,59	5,83
	187,54	189,77	50,51	48,28	17,02	3,46	2,61	7,21
	187,54	190,49	50,51	47,56	20,31	4,06	3,42	8,36
anti-horário	187,54	190,49	50,51	47,56	0	4,47	2,74	5,6
	187,54	189,29	50,51	48,76	12,86	4,60	2,03	3,05
	187,54	188,62	50,51	49,43	16,13	4,81	1,75	1,74
	187,03	186,60	50,51	51,45	23,4	5,16	0,72	-1,07

O ensaio EST7 foi realizado com praticamente os mesmos estados de tensão aplicados no ensaio EST6, com o objetivo de verificar a repetibilidade dos resultados. No final do ensaio foi aplicado ainda torque no sentido contrário (anti-horário) com o objetivo de avaliar a

variação da deformação cisalhante com a variação de α em ambos os sentidos. A Figura 5.17 apresenta as tensões e deformações obtidas neste ensaio. Observa-se que o ponto onde há um alívio na tensão cisalhante representa a mudança de direção da aplicação do torque. Para promover esta mudança, é necessário desconectar a mangueira de alimentação de ar comprimido do cilindro *bellofram*, que está aplicando o torque no sentido horário, e conectá-la no cilindro oposto. Assim o eixo do corpo de prova gira na direção contrária. O cálculo dos valores de σ_1 , σ_3 e α , considerou esta inversão de sentidos.

Comparando os resultados dos ensaios EST6 e EST7 verificou-se que o equipamento apresentou uma boa repetibilidade na realização dos ensaios, os resultados possuem a mesma ordem de grandeza e padrão de comportamento. Pequenas diferenças na magnitude dos resultados podem ser atribuídas a variações no valor das pressões aplicadas.

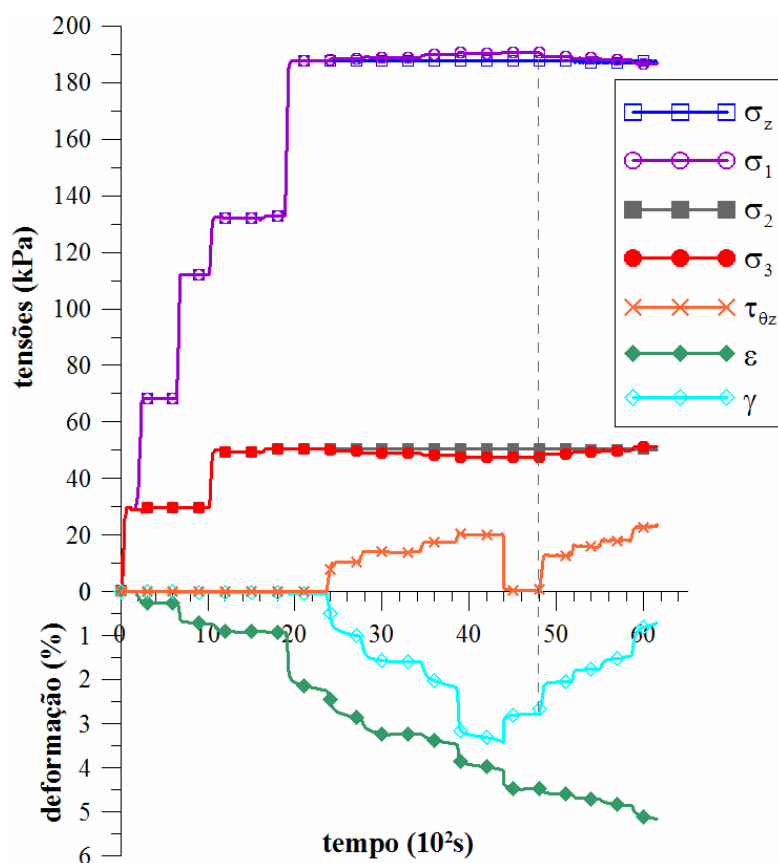


Figura 5.17 – Gráfico das tensões e deformações versus o tempo, aplicadas no ensaio EST 7.

O gráfico da Figura 5.18 mostra a variação do ângulo α com a deformação cisalhante (γ). As trajetórias seguidas pela relação entre α e γ , no sentido horário e anti-horário, possuem formato similar e são simetricamente opostas. Uma parcela de deformação cisalhante plástica é percebida pelo afastamento das trajetórias, próximo à origem do gráfico.

O ensaio EST8 foi realizado com uma relação entre a tensão desvio e a pressão confinante em torno de 2,5, possibilitando assim a aplicação de ângulos α maiores do que aqueles aplicados nos ensaios EST6 e EST7. Neste ensaio a tensão axial e a pressão confinante foram mantidas constantes, enquanto o torque foi aplicado em estágios. Aplicação de torque foi feita nos sentidos horário, anti-horário e horário novamente, de modo que o corpo de prova retornasse a um estado de tensões próximo ao inicial. A Tabela 5.7 apresenta as tensões e deformações correspondentes aos estados de tensões impostos ao corpo de prova durante o ensaio e o gráfico da Figura 5.19 ilustra o desenvolvimento destas tensões e deformações durante o ensaio. O gráfico da Figura 5.20 apresenta a variação do ângulo α com a deformação cisalhante (γ). Pode ser observado que a trajetória resultante da inversão consecutiva do sentido da tensão cisalhante forma um *loop*, de modo que o ângulo α no final do ensaio apresente um valor muito próximo ao α obtido no primeiro estágio de aplicação de torque.

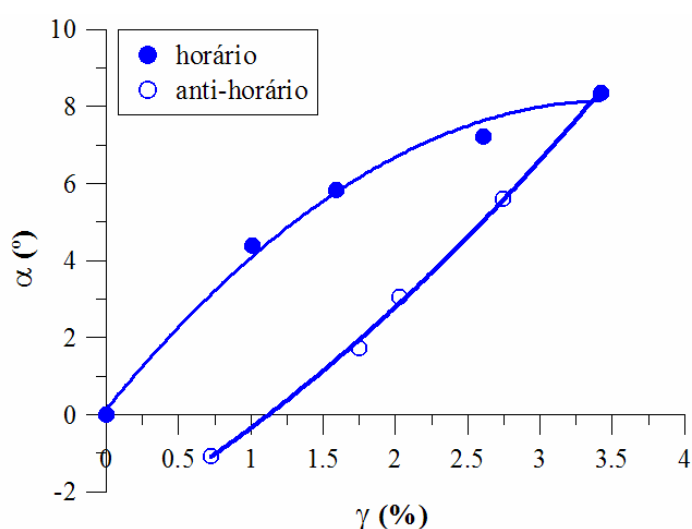


Figura 5.18 – Gráfico da rotação das tensões principais (α) versus a deformação cisalhante (γ) no ensaio EST 7.

Tabela 5.7 – Estados de tensão e deformação aplicados no corpo de prova do ensaio EST8.

Sentido do torque	σ_z (kPa)	σ_1 (kPa)	σ_2 (kPa)	σ_3 (kPa)	$\tau_{\theta z}$ (kPa)	ϵ (%)	γ (%)	α (°)
horário	126	126	50	50	0	0,53	0	0
	126	128,81	50	47,19	14,88	0,76	0,65	10,69
	126	130,16	50	45,84	18,25	0,79	0,96	12,84
	126	132,69	50	43,30	23,53	1,02	2,12	15,88
	126	134,24	50	41,75	26,36	1,39	3,46	17,38
anti-horário	126	134,25	50	41,77	1,08	1,77	2,88	13,00
	126	132,42	50	43,57	11,90	1,83	2,10	8,68
	126	130,73	50	45,26	16,71	1,87	1,67	5,51
	126	129,80	50	46,20	18,91	1,91	1,37	4,15
	126	128,03	50	47,96	22,59	1,94	0,74	2,01
	126	126,65	50	49,35	25,20	2,00	0,32	0,6
	126	124,54	50	51,46	28,84	2,16	-1,09	-1,23
	126	136,31	50	52,06	29,83	2,2	-2,3	-1,69
horário	126	123,99	50	52,0	2,77	2,51	-1,38	3,9
	126	125,45	50	50,57	10,74	2,61	-0,39	7,42
	126	127,13	50	48,87	15,90	2,64	0,29	10,88

A Figura 5.21 apresenta um círculo de *Mohr* que ilustra graficamente o último estado de tensões do primeiro ciclo de aplicação de torque horário nos ensaio EST8. Nele pode ser observada a dependência do ângulo α em relação às tensões principais e cisalhantes.

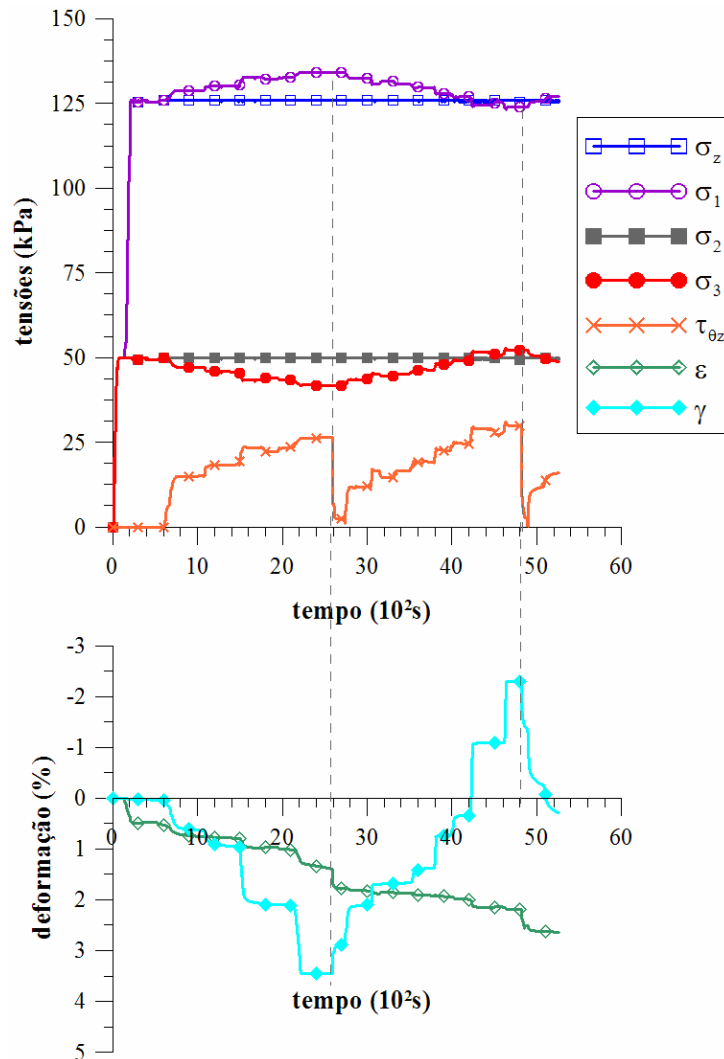


Figura 5.19 – Gráfico das tensões e deformações versus o tempo, aplicadas no ensaio EST 8.

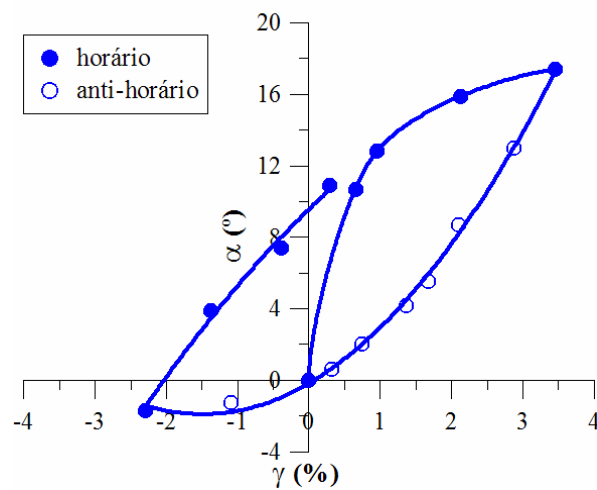


Figura 5.20 – Gráfico da rotação das tensões principais (α) versus a deformação cisalhante no ensaio EST 8.

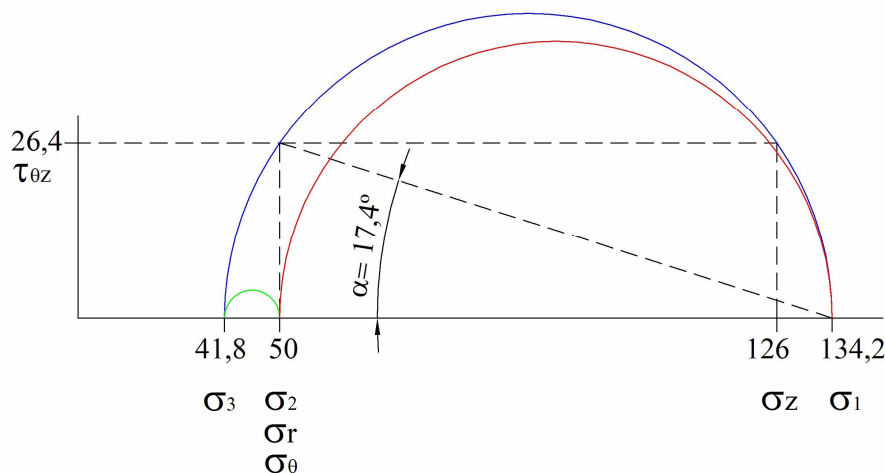


Figura 5.21 – Estado de tensões no ensaio EST8, representado pelo círculo de Mohr correspondente ao último incremento de torque do primeiro ciclo de aplicação com sentido horário.

5.2.2.2 Ensaios cíclicos

Foram realizados cinco ensaios *hollow cylinder* com carregamento cíclico no solo residual de arenito Botucatu compactado; em quatro desses ensaios foi aplicado torque estático. O Quadro 5.2 apresenta um resumo das características de cada ensaio. Neste quadro são apresentados: (i) o peso específico aparente seco do corpo de prova e seu teor de umidade correspondente; (ii) a seqüência de aplicação das pressões de ar nos diferentes ensaios; e (iii) uma breve descrição das principais características de cada ensaio. Os valores de pressão de ar indicados no referido quadro são valores aproximados, pois as leituras obtidas pelas células de carga durante o ensaio é que fornecem os dados efetivamente utilizados para o cálculo das tensões aplicadas ao corpo de prova.

O ensaio CIC1 foi de curta duração (390 ciclos) e realizado com o objetivo de avaliar a mudança de declividade, nos pulsos de deformação, em função da aplicação do torque. Foram aplicados uma pressão confinante de 20 kPa, uma tensão desvio de 50 kPa e dois incrementos de torque. O gráfico da Figura 5.22 apresenta os pulsos de deslocamento axial versus tempo, com os três estágios de tensões deste ensaio. No primeiro estágio, são aplicadas apenas a pressão confinante e a tensão desvio; no segundo, é aplicada uma tensão cisalhante de 11 kPa e, no terceiro, uma tensão cisalhante de 13 kPa. Pode-se observar que os deslocamentos axiais

crecem com a aplicação de torque. O gráfico da Figura 5.23 mostra em detalhe um trecho do ensaio CIC1, entre o segundo e o terceiro estágio, que mostra claramente o acréscimo do deslocamento vertical e, por consequência, o acréscimo da deformação permanente axial, quando é aplicado um novo incremento de torque.

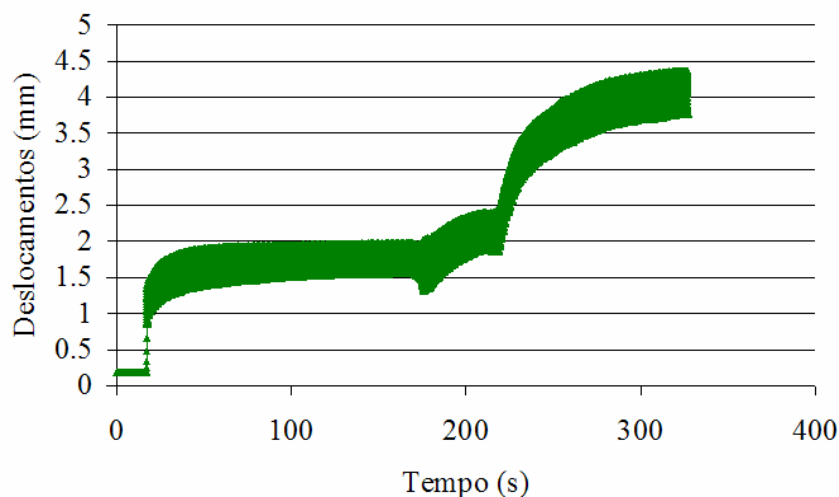


Figura 5.22 – Pulsos de deslocamento axial versus tempo no ensaio CIC1.

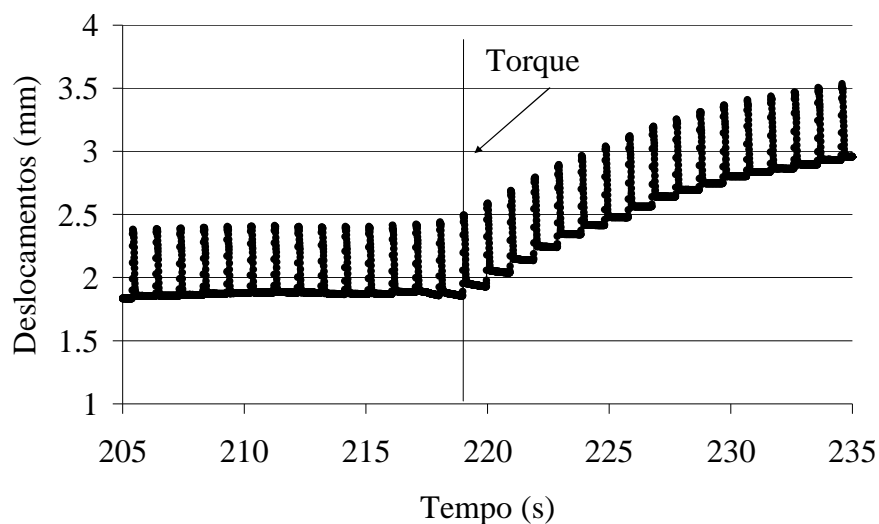


Figura 5.23 – Pulsos de deslocamento axial versus tempo no ensaio CIC1, destacando o detalhe do aumento de deslocamento axial com a aplicação de torque.

Quadro 5.2 – Quadro geral das características dos ensaios no equipamento *hollow cylinder torsional* com carregamento axial cíclico.

Ensaio	Corpo de prova		Seqüência de aplicação de pressões (pc: confinante, pa: axial, pt: torque)	Observações
	γ_d (kN/m ³)	ω (%)		
CIC1	16,3	12,6	pc: 20 kPa; pa: 30 kPa; pt: 0,30,40 kPa.	Ensaio de curta duração, com objetivo de avaliar a mudança da declividade nos pulsos de deformação em função da aplicação do torque.
CIC2	16,8	12,5	pc: 53 kPa; pa: 32 kPa; pt: 32 kPa.	Ensaio para avaliar a evolução das deformações permanentes com a aplicação do torque, mas a ruptura ocorreu durante a aplicação do segundo estágio de torque.
CIC3	16,7	12,3	pc: 30 kPa; pa: 36 kPa; pt: 0, 39 kPa.	Ensaio para avaliar a evolução das deformações permanentes com a aplicação do torque, realizado em dois estágios (com e sem torque).
CIC4	16,8	12,9	pc: 53 kPa; pa: 32, 44, 61 kPa; pt: 31 kPa.	Ensaio com multi-estágios de carregamento axial e pressão de ar constante no cilindro de torque
CIC5	17,2	12,6	pc: 53 kPa; pa: 33,42,62 kPa;	Ensaio com multi-estágios de carregamento axial e sem aplicação de torque, para comparação com ensaio no equipamento triaxial.

O ensaio CIC2 foi realizado para avaliar a evolução da deformação permanente com a aplicação de torque, mas a ruptura do corpo de prova ocorreu enquanto estava sendo aplicado o segundo estágio de tensão cisalhante. As tensões empregadas no primeiro e único estágio do ensaio foram: 53 kPa de pressão confinante, 75 kPa de tensão desvio e 15,5 kPa de tensão cisalhante. As correspondentes tensões principais σ_1 , σ_2 e σ_3 são 131, 53, e 50 kPa, respectivamente. O gráfico da Figura 5.24 mostra a variação da deformação permanente com o número de ciclos, obtida para este ensaio. Apesar do ensaio CIC2 não ter alcançado seu objetivo principal, uma constatação importante foi verificada nos seus resultados: a aplicação do carregamento cíclico axial promove um incremento na deformação cisalhante do corpo de prova. Mesmo com a tensão cisalhante constante, o deslocamento circunferencial no corpo de prova sofre pequenos incrementos à medida que os ciclos de carga axial são aplicados, até um determinado ponto onde ocorre a estabilização da deformação cisalhante. Este comportamento pode ser ilustrado pelo gráfico da Figura 5.25 que apresenta os pulsos de deslocamento axial e deslocamento circunferencial versus tempo.

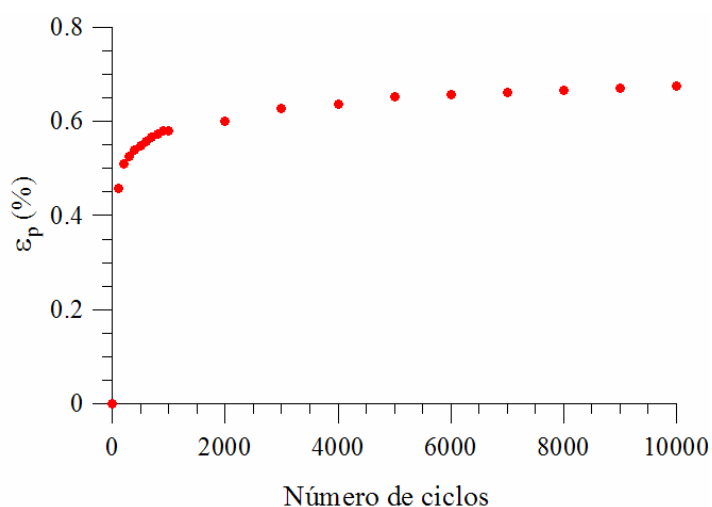


Figura 5.24 – Deformação permanente versus número de ciclos do ensaio CIC2.

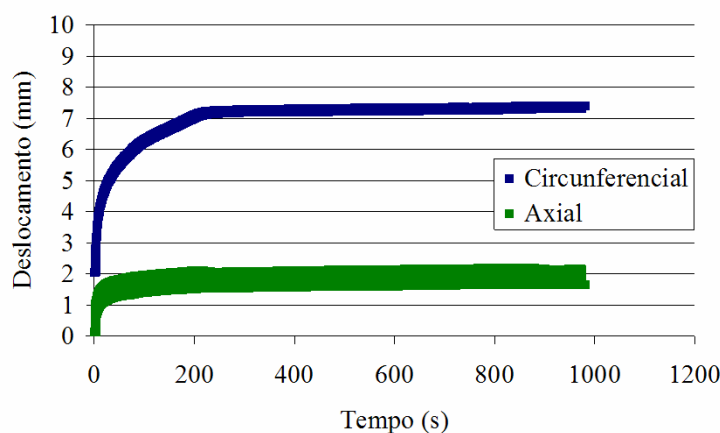


Figura 5.25 – Pulsos de deslocamento axial e circunferencial versus o tempo no ensaio CIC2.

O ensaio CIC3 também foi realizado para avaliar a evolução da deformação permanente com a aplicação de torque. O ensaio foi dividido em dois estágios de carregamento que são apresentados no gráfico de deformação permanente versus número de ciclos (Figura 5.26). No primeiro estágio, atuam no corpo de prova apenas a tensão desvio (86 kPa) e a pressão confinante (30 kPa). No segundo, são mantidas inalteradas a tensão desvio e a pressão confinante, mas o torque é aplicado, ocasionando uma tensão cisalhante na ordem de 20 kPa. As tensões principais σ_1 , σ_2 e σ_3 , no segundo estágio, são 120, 30, e 25 kPa, respectivamente. Observou-se um acréscimo de deformação permanente em torno de 0,2% após a aplicação de torque no corpo de prova.

O ensaio CIC4 foi realizado na modalidade de multi-estágios de carregamento axial, com a aplicação de torque e pressão confinante constantes. A Figura 5.27 apresenta a deformação permanente correspondente à aplicação dos três estágios de tensão desvio deste ensaio: 68, 104 e 148 kPa. A tensão cisalhante foi mantida constante com o valor de 16 kPa e a pressão confinante utilizada foi de 53 kPa. A Tabela 5.9 apresenta os valores das tensões atuantes em cada estágio de carregamento do ensaio e seus respectivos valores do ângulo α .

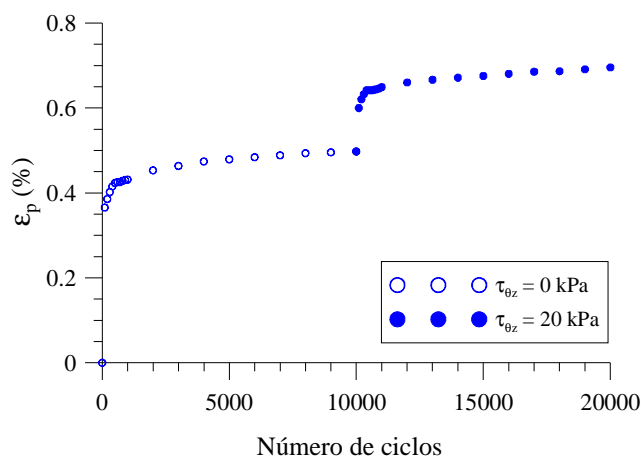


Figura 5.26 – Deformação permanente versus número de ciclos do ensaio CIC3.

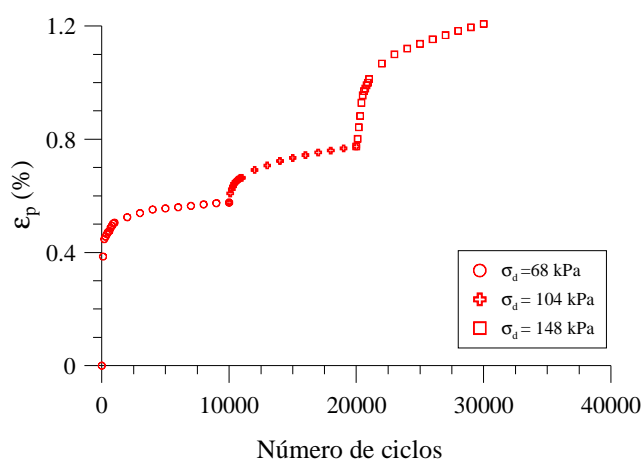


Figura 5.27 – Deformação permanente versus número de ciclos do ensaio CIC4.

Tabela 5.8 – Estados de tensões dos estágios do ensaio CI4.

Estágio	σ_z (kPa)	σ_1 (kPa)	σ_2 (kPa)	σ_3 (kPa)	$\tau_{\theta z}$ (kPa)	α (°)
1	121	124,6	53	49,4	16	12,6
2	157	159,4	53	50,6	16	8,6
3	201	202,7	53	51,3	16	6,1

O ensaio CIC5 foi realizado na modalidade de multi-estágios de carregamento axial, com a pressão confinante mantida constante e sem a aplicação de torque. O objetivo deste ensaio foi comparar a evolução das deformações permanentes obtidas nos ensaios realizados com equipamentos *hollow cylinder torsional* e triaxial. Foram aplicados no corpo de prova do ensaio *hollow cylinder*: uma pressão confinante constante de 53 kPa e três estágios de tensão desvio iguais a 91, 110 e 167 kPa. Cada estágio de tensão desvio teve uma duração igual a 10.000 ciclos. O ensaio triaxial utilizado para comparação com o ensaio CIC5 foi apresentado no item 5.1.2. Todos os estágios de tensão desvio aplicados no ensaio triaxial possuem uma duração de 80.000 ciclos, entretanto foram utilizados apenas os 10.000 primeiros ciclos de cada estágio, para comparação com os resultados do ensaio realizado no equipamento *hollow cylinder*. O gráfico da Figura 5.28 apresenta a evolução das deformações permanentes com o número de ciclos nos dois ensaios. Em ambos, foi utilizada uma pressão confinante de 53 kPa. O quadro da legenda indica as tensões desvio utilizadas em cada estágio. Observa-se que os primeiros estágios desses ensaios possuem valores de tensão desvio bem diferentes, o que inviabiliza uma comparação direta. O primeiro estágio do ensaio realizado no equipamento *hollow cylinder* utilizou uma tensão desvio maior e apresentou deformações permanentes maiores. No segundo estágio, os valores de tensão desvio aplicados nos dois ensaios são muito próximos e as deformações permanentes obtidas também. O resultado obtido no equipamento *hollow cylinder* foi um pouco menor que no equipamento triaxial. No terceiro e último estágio, foram utilizados valores de tensão desvio muito próximos e as deformações permanentes obtidas no equipamento *hollow cylinder* foram maiores. Esperava-se que as deformações permanentes medidas no ensaio *hollow cylinder* fossem realmente maiores que as obtidas no ensaio triaxial, por dois motivos:

- O corpo de prova para o ensaio *hollow cylinder* foi moldado com um peso específico aparente seco menor;
- A forma do corpo de prova do ensaio *hollow cylinder* (tubular com paredes finas) permite que se desenvolvam deformações laterais maiores em todos os sentidos, em relação ao corpo de prova cilíndrico do ensaio triaxial. Este aumento no grau de liberdade das deformações laterais reflete-se em um aumento na deformação permanente axial.

Apesar dos dois primeiros estágios não fornecerem bons resultados para comparação, os últimos estágios do ensaio *hollow cylinder* e do ensaio triaxial, que incluem as deformações

permanentes acumuladas nos estágios anteriores, comportam-se de acordo com as expectativas.

Além da comparação com o ensaio triaxial convencional, o ensaio CIC5 também pode ser comparado com o ensaio CIC 4, onde houve a aplicação de torque. Apesar das tensões desvio aplicadas em cada estágio do ensaio CIC4 serem menores que as correspondentes tensões desvio do ensaio CIC5, as deformações permanentes obtidas são maiores. Este incremento nas deformações permanentes pode ser creditado ao efeito da tensão cisalhante aplicada no corpo de prova, desenvolvida a partir da aplicação de torque. A Figura 5.29 ilustra esta comparação.

De um modo geral, o objeto principal da realização dos ensaios cíclicos no equipamento *hollow cylinder torsional* foi verificar a ocorrência do aumento da deformação permanente axial, em consequência da aplicação de tensão cisalhante no corpo de prova, como sugerido na literatura (Chan, 1990, High *et al.* 1983). Sabe-se que estes ensaios apresentam apenas uma aproximação da condição real de campo, pois na verdade a aplicação de tensão cisalhante é cíclica e defasada do pico de tensão axial. Entretanto, os resultados de deformação permanente, obtidos com a aplicação de torque estático, são consistentes quando comparados a uma condição de ensaio onde não se desenvolvem tensões cisalhantes. Por fim, a obtenção de resultados de ensaio com a mesma ordem de grandeza do equipamento triaxial convencional encerra o programa experimental desta tese com êxito, pois se constatou a validade e a potencialidade do equipamento *hollow cylinder torsional* desenvolvido.

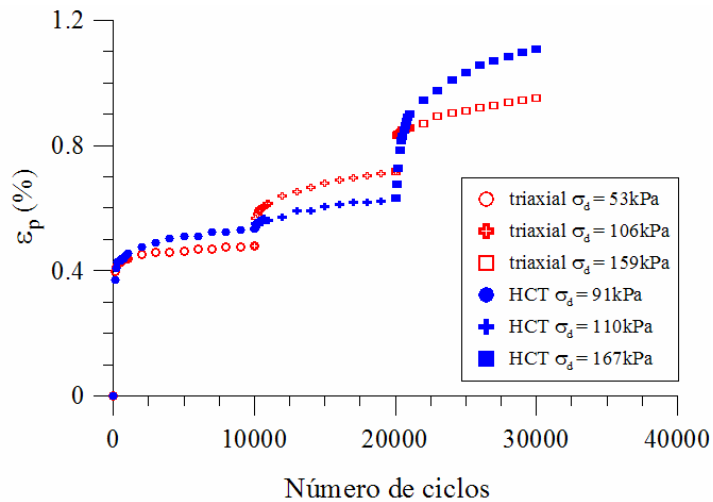


Figura 5.28 – Deformação permanente versus número de ciclos dos ensaios: CIC5 no equipamento *hollow cylinder torsional* (HCT) e triaxial no equipamento convencional.

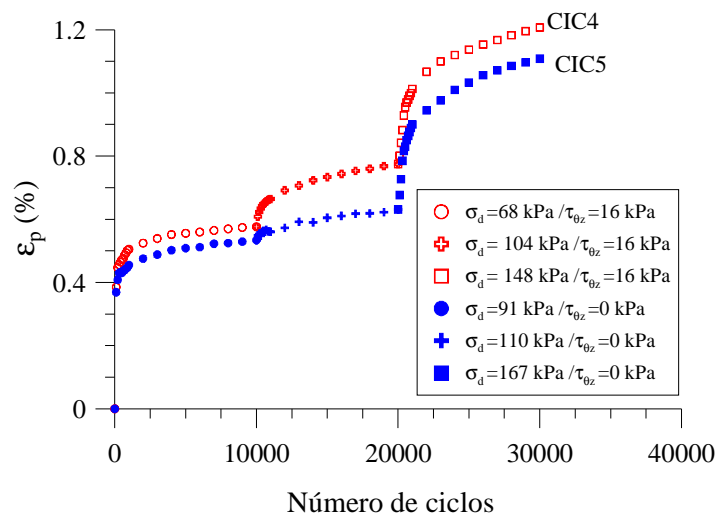


Figura 5.29 – Deformação permanente versus número de ciclos dos ensaios CIC 4 (com torque) e CIC5 (sem torque).

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

6.1 Conclusões

O principal objetivo desta tese - que foi projetar, montar e validar um equipamento *hollow cylinder torsional* - foi cumprido. O projeto deste equipamento, que envolveu um extenso período de pesquisa e idealização, iniciou-se em 2004 e estendeu-se praticamente até o final da montagem. A confecção das peças que compõem o equipamento exigiu minucioso detalhamento, como pode ser conferido nos desenhos apresentados no Anexo A desta tese. O processo de montagem do equipamento *hollow cylinder* iniciou-se em 2007, pois foi precedido por um período de usinagem e ajuste das peças e de aquisição de materiais complementares como: rolamentos, anéis *O-ring*, parafusos, conexões elétricas e pneumáticas, etc. Todos os encaixes das diferentes peças foram previamente testados e quando necessário, re-ajustados. Assim, ao terminar a fase de montagem do equipamento *hollow cylinder*, verificou-se que todas as peças cumpriam sua função e que o equipamento estava funcionando de acordo com o previsto no projeto, mesmo nos ensaios preliminares. Após a fase de montagem da estrutura principal do equipamento *hollow cylinder*, o quadro pneumático foi montado, a instrumentação foi instalada e o sistema de aquisição automática de dados foi programado. O equipamento iniciou sua operação no segundo semestre de 2008, quando então foram realizados os primeiros ensaios que verificaram seu adequado funcionamento e garantiram sua validação.

A metodologia de moldagem de corpos de prova para os ensaios *hollow cylinder* foi desenvolvida com base na literatura consultada e no tipo de solo empregado nesses ensaios. Apesar dos corpos de prova alcançarem um peso específico aparente seco um pouco abaixo do peso específico aparente seco máximo, definido na energia normal de compactação do ensaio Proctor, verificou-se que o método de moldagem produziu corpos de prova de boa qualidade. Sua aparente homogeneidade, sua reação à aplicação das cargas e as superfícies de ruptura formadas por cisalhamento, confirmam esta hipótese.

Como o objetivo de caracterizar o solo residual de arenito Botucatu utilizado nesta pesquisa, foram realizados ensaios de granulometria, peso específico real dos grãos, limites de *Atterberg*, compactação e índice de suporte Califórnia. Os resultados dos ensaios de caracterização foram comparados com os resultados de outros autores que também utilizaram

este solo em suas pesquisas. Verificou-se, ao comparar as curvas de compactação obtidas nas energias normal e modificada, que o método de compactação empregado não é adequado a este tipo de solo. Além dos ensaios de caracterização, foram realizados ensaios triaxiais de carregamento repetido no equipamento triaxial convencional. Estes ensaios foram realizados com o objetivo de determinar o módulo resiliente e avaliar o comportamento deste solo quanto às deformações permanentes. O solo residual de arenito Botucatu, apesar de predominantemente granular, possui uma quantidade razoável de finos. Ao utilizar os modelos de ajuste propostos pelo método DNER ME 131/94 para determinação do módulo resiliente, para solos granulares e coesivos, verificou-se que este solo possui um comportamento transitório. Optou-se, então, por utilizar um modelo composto para o ajuste do módulo de resiliência, em função da tensão desvio e da pressão de confinamento. Os ensaios para determinação da deformação permanente foram realizados na modalidade de multi-estágios de carregamento axial, para diferentes pressões de confinamento. Verificou-se que o aumento das deformações permanentes iniciais apresentou uma relação linear com a tensão desvio aplicada, enquanto a taxa de deformações permanentes apresentou uma tendência de estabilização para tensões desvio maiores.

Para promover a validação do equipamento construído, foram realizados ensaios *hollow cylinder* com carregamento axial estático e cíclico, com e sem aplicação de torque. Os primeiros ensaios foram realizados no corpo de prova teste, confeccionado em *nylon*, para verificar o sistema pneumático e a resposta da instrumentação. Em seguida, iniciaram-se os ensaios no solo residual de arenito Botucatu compactado. Os ensaios com carregamento axial estático em solo permitiram verificar o funcionamento e a potencialidade do equipamento, as relações entre as tensões aplicadas ao corpo de prova e as deformações obtidas, além da resposta do solo a diferentes solicitações. Em geral, estes ensaios foram relativamente simples: para tensões axiais e confinantes constantes, incrementos de tensão cisalhante foram aplicados, provocando um acréscimo na magnitude e no ângulo de rotação da tensão principal maior. As tensões provenientes da rotação do plano de tensões principais foram calculadas pela formulação que representa o estado de tensões no círculo de *Mohr*. As deformações, tanto axial como circunferencial, assim obtidas foram coerentes com as solicitações aplicadas nos corpos de prova durante os ensaios. Verificou-se que o sistema de aplicação de cargas funciona perfeitamente, porém serão necessários alguns ajustes no quadro pneumático, pois foi percebido que o modelo de válvula reguladora de pressão empregada no controle das pressões de ar axial e de torque não é adequado. O sistema de medição de torque, composto

por células de carga paralelas que medem o binário de forças promovido pela torção da base do corpo de prova, mostrou-se suscetível à aplicação do carregamento axial, necessitando de modificação do procedimento de montagem de ensaio. É possível que isto ocorreu em função de algum atrito desenvolvido entre a ponta do pistão de torque e a respectiva placa da célula de carga para medição de torque, durante a aplicação da carga axial. Portanto, a partir desta verificação, os pistões de torque passaram a iniciar os ensaios seguintes desencostados das células de carga, que passaram a ser solicitadas apenas quando o torque era efetivamente aplicado.

Foram realizados ensaios com carregamento axial cíclico na tentativa de determinar o módulo resiliente no equipamento *hollow cylinder torsional*. Foi verificado que os deslocamentos axiais medidos são maiores do que os esperados. Concluiu-se que estas medidas, além de incluir a deformação do corpo de prova, incluem também uma parcela de deformação do conjunto de peças que estão situadas entre o topo da câmara triaxial e o transdutor de deslocamento, que está instalado fora da câmara triaxial. Assim, os módulos resilientes determinados no equipamento *hollow cylinder* foram inferiores os obtidos no equipamento triaxial convencional. Acredita-se que a futura instalação do transdutor de deslocamento axial dentro da câmara triaxial resolverá este problema. Este acréscimo na medida do deslocamento axial do corpo de prova é verificado no momento da aplicação de cada carregamento cíclico, portanto acredita-se que não influencia diretamente na avaliação das deformações permanentes, pois estas são medidas no momento em que não há aplicação de carga axial.

O principal objetivo, ao realizar os ensaios com carregamento axial cíclico, foi verificar a resposta do equipamento *hollow cylinder torsional* na determinação das deformações permanentes. Os ensaios cíclicos, realizados sem aplicação de tensão cisalhante, buscaram reproduzir as condições próximas às empregadas em um equipamento triaxial convencional. Já os ensaios com aplicação de tensão cisalhante estática, visaram obter resultados um pouco mais próximos da condição de campo. A comparação dos resultados do *ensaio hollow cylinder* (sem torque) com os ensaios realizados no equipamento triaxial convencional, mostrou coerência da ordem de grandeza das deformações permanentes medidas. A pequena variação entre os resultados pode ser atribuída a pequenas diferenças na geometria dos corpos de prova, nas suas densidades e nos estados de tensão aplicados. Os ensaios de carregamento axial cíclico, com aplicação de tensão cisalhante no corpo de prova, apresentaram um

aumento da deformação permanente axial em relação aos ensaios com tensão cisalhante nula, conforme esperado. Também foi verificado que a aplicação de carregamento axial cíclica ocasiona um acréscimo nas deformações cisalhantes no corpo de prova, mesmo com a tensão cisalhante mantida constante. Sabe-se que estes ensaios representam apenas uma aproximação da condição de campo, pois na realidade a aplicação de tensão cisalhante também é cíclica e defasada do pico de tensão axial. Considera-se que os resultados obtidos nestes ensaios encerram o programa experimental desta tese com êxito, pois se constatou a validade e a potencialidade do equipamento *hollow cylinder torsional* construído.

O porte e a complexidade de um equipamento *hollow cylinder torsional* requerer uma demanda futura de ajustes contínuos nos seus primeiros anos de operação. Um projeto cuidadoso e detalhado garantiu que o equipamento *hollow cylinder torsional* desenvolvido nesta tese conseguisse entrar em operação sem dificuldades, em um curto período de tempo após sua montagem. O programa de ensaios desenvolvidos neste equipamento foi compacto, mas apresentou os resultados necessários para garantir sua validação. A realização de ensaios em um equipamento com as amplas possibilidades do *hollow cylinder torsional* permite simular, com maior nível de detalhe, os efeitos dos carregamentos impostos pelos mais diversos tipos de solicitações que ocorrem em campo, como o tráfego em pavimentos rodoviários, aeroportuários e subleitos de ferrovias. Sua aplicação na análise do comportamento geomecânico de solos abre o horizonte de pesquisas em infra-estrutura de transportes na Universidade Federal do Rio Grande do Sul e no Brasil, pois não se tem conhecimento de outro equipamento deste tipo em operação no país até o momento.

6.2 Sugestões para futuros trabalhos

A possibilidade de emprego do equipamento *hollow cylinder torsional* no estudo do comportamento geomecânico dos solos é praticamente ilimitada. Além da análise do comportamento das camadas de solo que compõem a estrutura dos pavimentos, a revisão bibliográfica desta tese ilustra uma gama de aplicações, como o estudo da anisotropia dos solos, análises de ruptura de taludes, liquefação de areias, etc. As sugestões que seguem refletem as necessidades mais imediatas à continuidade do projeto de pesquisa que se iniciou com esta tese:

- Desenvolver métodos de moldagem de corpos de prova adequados a cada tipo de solo que será ensaiado. Deve-se adaptar ao molde desenvolvido nesta tese, um sistema de compactação com um soquete mais pesado que propicie a obtenção de densidades mais altas.
- Deve-se solucionar o problema de queda de pressão de ar no ensaio durante o ligamento do compressor. A hipótese inicial para evitar este efeito é a troca das válvulas reguladoras de pressão de ar, utilizadas para aplicação do torque e do carregamento axial. Sugere-se a utilização de válvulas proporcionais de grande vazão.
- Desenvolver um temporizador que controle a aplicação intercalada de carregamento axial cíclico e torque cíclico, de modo a simular com maior fidelidade as tensões que ocorrem na camada de solo dos pavimentos solicitados pelo tráfego de veículos.
- Instalar o transdutor de deslocamento axial dentro da câmara triaxial de ensaio de modo que sejam medidas apenas as deformações axiais do corpo de prova.
- Desenvolver um sistema de aplicações de carga servo-controlado, substituindo os reguladores de pressão por válvulas proporcionais, que podem ser controladas diretamente pelo computador. Assim, o controle do carregamento passa a ser automático (o que permitirá, em particular, o controle independente dos parâmetros α e b).
- Desenvolver um sistema de medição local de deformações axiais e radiais para instalação diretamente no terço médio do corpo de prova, com sensores de Efeito *Hall*.
- Estudar a possibilidade e desenvolver sistema de adaptação deste equipamento para a realização de ensaios em corpos de prova de misturas asfáltica.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (1996). **Standard method for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials**. AASHTO TP46-94, 1996, 30p.
2. AMPADU, S. K., TATSUOKA, F. (1993). A hollow cylinder torsional simple shear apparatus capable of a wide range of shear strain measurement. **Geotechnical Testing Journal**, vol. 16, n° 1, p. 3-17.
3. ANSELL, P. (1977). **Cyclic simple shear testing of granular material**. PhD Thesis, University of Nottingham, London, 1977.
4. ARNOLD, G., DAWSON, A.R, HUGHES, D., ROBINSON, D. (2004) Deformation Behavior of Granular Pavements. Pavement Unbound, UNBAR 5, ed. Balkema, Rotterdam, p. 169 a 177. **Proceedings...**
5. ARTHUR, J. R. F., CHUA, K. S., DUNSTAN, T., RODRIGUEZ DEL C., J. I. (1980). Principal stress rotation: a missing parameter. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, vol. 106, n° GT4, p. 419-433.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). **Solo - determinação do limite de liquidez**: ABNT NBR 6459, 1984, 6p.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). **Grãos de solo que passam na peneira 4,8mm - determinação da massa específica**. ABNT NBR 6508, 1984, 8p.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). **Solo - determinação do limite de plasticidade**. ABNT NBR 7180, 1984, 3p.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). **Solo - análise granulométrica**. ABNT NBR 7181, 1984, 13p.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986). **Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**: ABNT NBR 6457, 1986, 9p.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986). **Solo – Ensaio de Compactação**. ABNT NBR 7182, 1986, 10p.

12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). **Solo – Índice de Suporte Califórnia**. ABNT NBR 9895, 1987, 10p.
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1995). **Rochas e Solos**. ABNT NBR 6502, 1995, 18p.
14. BILÉ SERRA, J.P., HOOKER, P. A New Computer Controlled Hollow Cylinder Torsional Shear Apparatus. Disponível em 01/05/07, no endereço eletrônico: http://www.gdsinstruments.com/support/pdf/ph_hca_prague2003.pdf
15. BISHOP, A.W. (1966). The strength of soils as engineering materials. **Géotechnique**, vol 16, n°. 2, p. 91-128.
16. BISHOP, A.W., WESLEY, L.D. (1975). A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing. **Géotechnique**, vol 25, n°. 4, p. 567-670.
17. BROMS, B.B., RATMAN, M.V. (1963). Shear strength of an anisotropically consolidated clay. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, ASCE, vol. 89, SM6, p. 1-25.
18. BROWN, S.F. (1996). Soil mechanics in pavement engineering. **Géotechnique**, vol 46, n°. 3, p. 383-426.
19. BROWN, S.F., HYDE, A.F.L. (1975) Significance of cyclic confining stress in repeated-load triaxial testing of granular material. **Transportation Research Record**, TRB, n° 537, p.49-58.
20. BROWN, S.F., RICHARDSON, I.R. (2004). A hollow cylinder apparatus to study the cyclic loading behavior of dry granular material. **Advances in Geotechnical Engineering: The Skempton Conference**, London. Ed. Thomas Telford, London, vol. 1, p. 369-380. **Proceedings...**
21. CAMAPUM, C.J., CRISPEL, J., MIEUSSENS, C., NARDONE, A. (1987). **La reconstitution des éprouvettes en laboratoire – Théorie e pratique opératoire**. Rapport de recherche LPC n° 145, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Toulouse, France.
22. CAMPANELLA, R.G., VAID, Y.P. (1973). Influence of stress path on the plane strain behaviour of a sensitive clay”. 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow. Ed. A. A. Balkema, Rotterdam, vol. 1, p. 85-92. **Proceedings...**

23. CAMPOS, L. F. G. (1889). Seção geológica. *In*: Derby, O. A. **Relatório da Comissão Geographica e Geológica da Província de São Paulo**. São Paulo, Comissão Geographica e Geológica, 1889, p. 21-34.
24. CHAN, F.W.K. (1990). **Permanent deformation resistance of granular layers in pavements**. PhD. thesis, University of Nottingham, Nottingham, United Kingdom.
25. CHAN, F.W.K., BROWN, S.F. (1994). Significance of principal stress rotation in pavements. 13th. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi. Ed. A. A. Balkema, Rotterdam, vol. 4, p. 1823-1826. **Proceedings...**
26. CHAUDHARY, S.K., KUWANO, J., HASHIMOTO, S., HAYANO, Y., NAKAMURA, Y. (2002). Effects of initial fabric and shearing direction on cyclic deformation characteristics of sand. **Soils and Foundations**, vol. 42, n°1, p.147-157.
27. COOP, M.R. (2000). The influence of particle breakage and state on the behaviour of sands. *In*: 2nd International Workshop on Crushable Soils, **Proceedings...**
28. COOLING, L.F., SMITH, B.A. (1936). The shearing resistance of soils. **Journal of the Institution of Civil Engineers**, London, vol. 3, p.333-343.
29. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1994). **Solos – determinação do módulo de resiliência**. Método de ensaio DNER – ME 131/94, 8p.
30. D'ONOFRIO, A., SILVESTRI, F. AND VINALE, F. (1999). A new torsional shear device. **Geotechnical Testing Journal**, ASTM, 22(2), p.101-112.
31. DOBEREINER, L.; de FREITAS, M.H. (1986). Geotechnical properties of weak sandstones. **Géotechnique**, vol. 36, n° 1, p. 79-94.
32. ERGUN, M.U. (1981). Evaluation of three-dimensional shear testing. 10th. International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm. A. A. Balkema, Rotterdam, vol. 1, p. 593-596. **Proceedings...**
33. FERREIRA, P.M.V. (1998) **Estudo de um solo residual de arenito da rodovia RS 239 - ensaios triaxiais servo-controlados**. Dissertação de Mestrado, CPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 116p.
34. FERREIRA, J.G.H.M., MOTTA, L.M.G. (2002). Análise comparativa de modelo de resiliência de solos e materiais não tratados quimicamente. XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Natal. vol. 1, p. 109- 120. **Anais...**

35. FOSTER, C.R. (1962). **“Field Problems: Compaction” – Foundation Engineering**. G. A. Leonards (ed), McGraw Hill, New York, p. 1000-1024.
36. GEOFFROY H., DI BENEDETTO, H., DUTTINE, A., SAUZÉAT, C. (2003). Dynamic and cyclic loadings on sands: results and modeling for stress-strain conditions. 3rd International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials. Lyon, 2003, France, p.353-363. **Proceedings...**
37. GEORGIANNOU, V.N. (1988). **The behaviour of clayey sands under monotonic and cyclic loading**. PhD. Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, London, United Kingdom.
38. GRÄBE (2002). **Resilient and permanent deformation of railway foundations under principal stress rotation**. PhD. Thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Southampton, Southampton, United Kingdom.
39. HIGHT, D.W., GENS, A., SYMES, M.J. (1983). The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils. **Géotechnique**, vol 33, n°. 4, p. 355-383.
40. HONG, W. P., LADE, P.V. (1989). Strain increment and stress directions in torsion shear tests. **Journal of Geotechnical Engineering**, vol. 115, n°10, p. 1388-1401.
41. IBGE (1996). **Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Levantamento de Recursos Naturais**, v.33, Rio de Janeiro: IBGE, 1986. 796p.
42. INGLES, O.G.; METCALF, J.B. (1972). **Soil stabilization: principles and practice**. Butterworths, Melbourne, 1972, 374p.
43. ISHIHARA, K. (1993). Liquefaction and flow failure during earthquakes. **Géotechnique**, vol. 43, n° 3, p. 351-415.
44. ISHIHARA, K., TOWHATA, I. (1983). Sand response to cyclic rotation of principal stress directions as induced by wave loads. **Soils and Foundations**, vol. 23, n° 4, p. 12-26.
45. JARDINE, R.J. (1997). **A new hollow cylinder apparatus**. Imperial College Internal Report.
46. JARDINE, R.J. GENS, A., HIGHT, D.W., COOP, M.R. (2004). Developments in understanding soil behavior. Conference on advances in geotechnical engineering: The Skempton Conference. London, 2004, UK, vol. 1, p. 103-206. **Proceedings...**

47. KO, H.Y., SCOTT, R.F. (1967). A new soil testing apparatus. **Géotechnique**, vol 17, n° 1, p. 40-57.
48. KUERBIS, R., VAID, Y.P. (1988). Sand sample preparation- the slurry deposition method. **Soils and Foundations**, vol. 28, n° 4, p. 107-118.
49. LADE, P.V. (1981). Torsion shear apparatus for soil testing. ASTM Symposium on Laboratory Shear Strength of Soil, Chicago. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, STP 740, p. 145-163. **Proceedings...**
50. LAMBE, T.W., WHITMAN, R.V. (1979). **Soil mechanics, SI version**. John Wiley & Sons, New York, 553p.
51. LASHINE, A.K., BROWN, S.F., PELL, P.S. (1971). Dynamic properties of soils. Report n°2 submitted to Koninklijke/Shell Laboratorium, Dept. of Civil Engineering, University of Nottingham.
52. LEKARP, F., DAWSON, A. (1998). Modeling permanent deformation behavior of unbound granular materials. **Construction and Building materials**, vol. 12, n°1, p. 9-18.
53. LEKARP, F.; ISACSSON, U. (2000). Development of a large-scale triaxial apparatus for characterization of granular materials. **International Journal of Road Materials and Pavement Design**. vol. 1 n° 2, p. 165-196.
54. LEKARP, F.; ISACSSON, U. (2001). The effects of grading scale on repeated load triaxial tests results. **International Journal of Pavement Engineering**. vol. 2, n° 2, p. 85-101.
55. LEKARP, F., ISACSSON, U., DAWSON, A. (2000a). State of the art I – Resilient response of unbound aggregates. **Journal of Transportation Engineering**, ASCE, vol. 126, n°1, p. 66-75.
56. LEKARP, F., ISACSSON, U., DAWSON, A. (2000b). State of the art II – Permanent strain response of unbound aggregates. **Journal of Transportation Engineering**, ASCE, vol. 126, n°1, p. 76-83.
57. LEKARP, F., RICHARDSON, I., DAWSON, A. (1996). Influences on permanent deformation behavior of unbound granular materials. **Transportation Research Record**, TRB, n°1547, p. 68-75.
58. LEROUÉIL, S., HIGHT, D.W. (2002). ‘‘Mechanical behaviour and properties of natural soils and soft rocks’’. International Workshop on Characterization and Engineering

Properties of Natural Soils, Singapore, A. A. Balkema Publishers, vol. 1, p. 29-254. **Proceedings...**

59. MAGISITRIS, F.S., SILVESTRI, F., VINALE, F. (1998). The influence of compaction on the mechanical behaviour of a silty sand. **Soils and Foundations**, vol. 38, n°4, p. 41 – 56.

60. MALYSZ, R. (2004). **Comportamento mecânico de britas empregadas em pavimentação**. Dissertação de Mestrado, PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 2004, 166p.

61. MARTINS, F.B., FERREIRA, P.V., BRESSANI, L.A., BICA, A.D.V. (1998) Comportamento tensão x deformação de um solo residual de arenito. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Brasília, vol.1, p.27-33. **Proceedings...**

62. MARTINS, F.B. (2001). **Investigação do comportamento mecânico de um solo naturalmente estruturado**. Tese de doutorado, PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 2001, 277p.

63. MEDINA, J., MOTTA, L.M.G. (2005). **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro, 2005, 2° edição, 574 p.

64. MENKITI, C.O. (1995). **Behaviour of clay and clayey-sand, with particular reference to principal stress rotation**. MSc. Dissertation, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, London, United Kingdom.

65. MINH, N.A. (2006). **An investigation of the anisotropic stress-strain-strength characteristics of an Eocene clay**. PhD. thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, London, United Kingdom.

66. MIURA, K., MIURA, S., TOKI, S. (1986a). Deformation behavior of anisotropic dense sand under principal stress axes rotation. **Soils and Foundations**, vol. 26, n° 1, p. 36-52.

67. MIURA, K., TOKI, S., MIURA, S. (1986b). Deformation prediction for anisotropic dense sand during principal stress axes rotation. **Soils and Foundations**, vol. 26, n° 3, p. 42-56.

68. MORGAN, J.R. (1966). The response of granular materials to repeated loading. 3th Australian Road Research Board, p.1178-1192. **Proceedings...**

69. MORGAN, J.R. (1972). Laboratory tests on fine crushed rock. 6th Australian Road Research Board, vol. 6, p.179-194. **Proceedings...**

70. NAKATA, Y., HYODO, M., MURATA, H., YASUFUKU, N. (1998). Flow deformation of sands subjected to principal stress rotation. **Soils and Foundations**, vol. 38, n° 2, p. 115-128.
71. NASREDDINE, K. (2004). **Effet de la rotation des contraintes sur le comportement des sols argileux**. Docteur thèse, L'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Île-de-France, France.
72. NISHIMURA, S. (2005). **Laboratory study on anisotropy of natural London Clay**. PhD. thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, London, United Kingdom.
73. NISHIMURA, S., ANH-MINH, N., JARDINE, R. J., (2007). A detailed study of the anisotropy of London Clay. **Géotechnique**, vol. 57, n° 1, p. 33–48.
74. NÚÑEZ, W.P. (1991). **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação**. Dissertação de Mestrado, PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 1991, 155p.
75. ODA, M., KOISHIKAWA, I., HIGUCHI, T. (1978). Experimental study of anisotropic shear strength of sand by plane strain test. **Soils and Foundations**, vol. 18, n°1, p.25-38.
76. O'KELLY, B.C., NAUGHTON, P.J. (2005a). Engineering properties of wet-pluviated hollow cylindrical specimens. **Geotechnical Testing Journal**, ASTM, vol. 28, n° 6, p.1-7.
77. O'KELLY, B.C., NAUGHTON, P.J. (2005b). Development of a new hollow cylinder apparatus for stress path measurements over a wide strain range. **Geotechnical Testing Journal**, ASTM, vol. 28, n° 4, p.1-10.
78. O' REILLY, M.P. (1985). **Mechanical properties of granular materials for use in thermal energy stores**. PhD. thesis, University of Nottingham, Nottingham, United Kingdom.
79. PAUTE, J.L., HORNYCH, P., BENABEN J.P. (1993). Repeated load triaxial testing of granular materials in the French Network of Laboratories des Ponts et Chaussées. European Symposium on Flexible Pavements – Euroflex. Lisboa, Portugal, p. 1-95. **Proceedings...**
80. PITMAN, T.D., ROBERTSON, P.K., SEGO, D.C. (1994). Influence of fines on the collapse of loose sands. **Canadian Geotechnical Journal**, vol. 31n°5, p. 728-739.
81. PRADEL, D., ISHIHARA, K., GUTIERREZ, M. (1990). Yielding and flow of sand under principal stress axes rotation. **Soils and Foundations**, vol. 30, n° 1, p. 87-99.

82. PRADHAN, T.B.S., TATSUOKA, F., HORH, N. (1988). Simple shear testing on sand in a torsional shear apparatus. **Soils and Foundations**, vol. 28, n°2, p. 95-112.
83. PREUSSLER, E.S. (1983). **Estudo da deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1983, 266p.
84. RICHARDSON, I.R., CHAPMAN, D.N., BROWN, S. (1996). Relating failure tests performed in hollow cylinder apparatus to inherent anisotropy. **Transportation Research Record**, n°1526, TRB, pp. 149-156.
85. RICHARDSON, I.R. (1999). **The stress-strain behavior of dry granular material subjected to a repeated loading in a hollow cylinder apparatus**. PhD. thesis, University of Nottingham, Nottingham, United Kingdom.
86. ROCHA CAMPOS, A.C., CORDANI, U.G., KAMASHITA, K., SONOKI, H.M., SONOKI, I.K. (1988) **Age of the Parana flood volcanism. The Mesozoic Flood Volcanism of the Parana Basin**, Eds: Piccirillo and Melfi, 1988.
87. ROLLO, R. (2003). **The anisotropic stress-strain-strength behaviour of brittle sediments**. PhD Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, 2003, 531p.
88. ROSCOE, K.H. (1953). An apparatus for application of simple shear to soil samples. 3rd. International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich, vol. 1, p. 186-191. **Proceedings...**
89. SAADA, A.S., BAAH, A.K. (1967). Deformation and failure of a cross anisotropic clay under combined stress. 3rd. Pan-American Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 1, p. 67-88. **Proceedings...**
90. SAADA, A.S., TOWNSEND, F. C. (1981). State of the art: Laboratory strength testing of soil. ASTM Symposium on Laboratory Shear Strength of Soil, Chicago. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, STP 740, p. 7-77. **Proceedings...**
91. SAADA, A., PUCCINI, P. (1985). Discussion. **Géotechnique**, vol 35, n°. 1, p. 78-85.
92. SAYÃO, A.S.F.J. (1989). **Behaviour of sand under general stress paths in the hollow cylinder torsional device**. PhD thesis, University of British Columbia, Canadá, 196p.

93. SAUZÉAT, C., DI BENEDETTO, H., CHAU, B., PHAM VAN BANG, D. (2003). A rheological model for the viscous behaviour of sand. 3rd International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials. Lyon, France, p.1201-1209. **Proceedings...**
94. SHIBUYA, S. (1988). A servo system for hollow cylinder testing of soils. **Geotechnical Testing Journal**, vol. 11, n°2, p. 109-118.
95. SOUSA, J.B., CRAUS, J., MONISMITH, C.L. (1991). **Summary Report on Permanent deformation in Asphalt Concrete**. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., 1991, 125 p.
96. SYMES, M. J. P. R., GENS, A., HIGHT, D. W. (1984). Undrained anisotropy and principal stress rotation in saturated sand. **Géotechnique**, vol 34, n° 1, p. 11-27.
97. TALESNICK, M., FRYDMAN, S. (1990). The preparation of hollow cylinder specimens from undisturbed tube samples of soft clay. **Geotechnical Testing Journal**, vol.13, n° 3, p. 243-249.
98. TALESNICK, M., FRYDMAN, S. (1991). Simple shear of an undisturbed soft marine clay in NGI and torsional shear equipment. **Geotechnical Testing Journal**, vol.14, n° 2, p. 180-194.
99. TALESNICK, M., RINGEL, M. (1999). Completing the hollow cylinder methodology for testing of transversely isotropic rocks: torsion testing. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science**, vol. 36, p. 627 – 639.
100. TALESNICK, M., KATZ, A., RINGEL, M. (2000). An investigation of the elastic stress-strain behavior of a banded sandstone and a sandstone-like material. **Geotechnical Testing Journal**, vol.23, n° 3, p. 257-273.
101. TALESNICK, M., HATZOR, H.Y., TSESARSKY, M. (2001). The elastic deformability and strength of a high porosity, anisotropic chalk. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science**, vol. 38, p. 543 – 555.
102. TATSUOKA, F., MURAMATSU, M., SASAKI, T. (1982) Cyclic undrained stress-strain behavior of dense sands by torsional simple shear test. **Soils and Foundations**, vol. 22, n° 2, p. 55-70.
103. TATSUOKA, F., OCHI, K., FUJII, S., OKAMOTO, M. (1986a) Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sands for different sample preparation methods. **Soils and Foundations**, vol. 26, n° 3, p. 23-41.

104. TATSUOKA, F., SONADA, S., HARA, K., FUKUSHIMA, F., PRADHAN, T.B.S. (1986b) Failure and deformation of sand in by torsional shear. **Soils and Foundations**, vol. 26, n° 4, p. 79-97.
105. TATSUOKA, F. SIDDIQUEE M. S.A., PARK, C.S., SAKAMOTO, M., ABE, FUMIHIRO. (1993). Modelling stress-strain relation of sand. **Soils and Foundations**, vol. 33, n° 2, p. 60-81.
106. TIMOSHENKO, S.P., GOODIER, J.N. (1970) **Theory of elasticity**. McGraw-Hill, New York.
107. THEVANAYAGAM, S., MOHAN, S. (2000). Intergranular state variables and stress-strain behaviour of silty sands. **Géotechnique**, vol. 50, n° 1, p. 1-23.
108. THOM, N.H. (1988). **Design of road foundations**. PhD. thesis, University of Nottingham, Nottingham, United Kingdom.
109. TUTUMLUER, E. SEYHAN, U. (2000). Effects of fine content on the anisotropic response and characterization of unbound aggregate bases. 15th Unbound Aggregates in Road Construction/ Unbar 5. Nottingham, p. 153-160. **Proceedings...**
110. TUTUMLUER, E., SEYHAN, U. CHAN, J. (2000). Characterization of Granular Materials Subjected to Complex Static and Dynamic Loadings. 14th ASCE Engineering Mechanics Conference, EM 2000, Austin. **Proceedings...**
111. VAID, Y. P., SAYÃO, A., HOU, E., NEGUSSEY, D. (1990). Generalized stress-path-dependent soil behaviour with a new hollow cylinder torsional apparatus. **Canadian Geotechnical Journal**, vol. 27, p. 601- 616.
112. WIJEWICKREME, D., VAID, Y. P. (1991). Stress nonuniformities in hollow cylinder torsional specimens. **Geotechnical Testing Journal**, vol. 14, n° 4. p. 349-362.
113. YOSHIMINE, M., ISHIHARA, K., VARGAS, W. (1998). Effects of principal stress direction and intermediate principal stress on undrained shear behavior of sand. **Soils and Foundations**, vol. 38, n° 3, p. 179-188.
114. YOSHIMINE, M., ÖZAY, R., SEZEN, A. ANSAL, A. (1999). Undrained plane strain shear tests on saturated sand using a hollow cylinder torsional shear apparatus. **Soils and Foundations**, vol. 39, n° 2, p. 131-136.
115. YOUD, T.L. (1972). Compaction of sands by repeated shear straining. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, ASCE. Vol. 98, n° SM7, p.709-725.

116. ZDRAVKOVIC, L (1996). **The stress-strain-strength anisotropy of a granular medium under general stress conditions**. PhD. Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London.
117. ZDRAVKOVIC, L., JARDINE, R. J. (1997). Some anisotropic stiffness characteristics of a silt under general stress conditions. **Géotechnique**, vol. 47, n° 3, p.407-437.
118. ZDRAVKOVIC, L., JARDINE, R. J. (2000). Undrained anisotropy of K_0 consolidated silt. **Canadian Geotechnical Journal**, vol. 37, n° 1, p. 178- 200.

ANEXO A

Pranchas de montagem do equipamento

Hollow cylinder torsional

Relação das pranchas apresentadas neste anexo:

- CA-01 Cilindro de acrílico da câmara triaxial
- CP-01 Corpo de prova teste
- EM-01 Disco inferior da câmara triaxial
- EM-02 Disco superior da câmara triaxial
- EM-03 Tampa do disco superior da câmara triaxial
- EM-04 Barras de suporte da câmara triaxial
- EM-05 Porca de fixação das placas superior e inferior nas barras de suporte da câmara triaxial
- EM-06 Fixação da barra central no disco inferior da câmara triaxial – esquema de montagem
- EM-07 Fixação da barra central no disco inferior da câmara triaxial – detalhamento das peças
- EM-08 Porcas de fixação das barras de suporte da câmara triaxial, na placa de alumínio da base do equipamento
- EM-09 Peças para fixação do rolamento linear na placa de alumínio intermediária – esquema de montagem
- EM-10 Peças para fixação do rolamento linear na placa de alumínio intermediária – detalhamento das peças
- EM-11 Placa de alumínio da base da câmara triaxial
- EM-12 Detalhes da prancha EM-11
- EM-13 Barra central
- EM-14 Fixação da barra central no eixo do cilindro *Bellofram*
- EM-15 Peças de fixação da barra central no eixo do cilindro *Bellofram*
- EM-16 Esquema de montagem da placa intermediária
- EM-17 Placa de alumínio intermediária
- EM-18 Peças de fixação de elementos na placa intermediária
- EM-19 Bucha para instalação de rolamentos lineares nas barras de suporte da câmara

- EM-20 Base do pedestal do corpo de prova
- EM-21 Peça intermediária entre a base e o pedestal
- EM-22 Pedestal do corpo de prova
- EM-23 Base e topo do corpo de prova
- EM-24 Cabeçote do corpo de prova
- EM-25 Esquema de montagem e fixação das células de carga (corte)
- EM-26 Esquema de montagem e fixação das células de carga (planta)
- EM-27 Cabeçote de transferência de carga
- EM-28 Viga de torque
- EM-29 Pistões de carga
- EM-30 Placa de fixação da célula de carga axial
- EM-31 Peças para fixação da célula de carga de torque
- EM-32 Esquema de fixação dos transdutores de deslocamento
- EM-33 Peças de fixação do transdutor de deslocamento horizontal
- EM-34 Peças de fixação do transdutor de deslocamento vertical
- EM-35 Usinagem da roda dentada
- EM-36 Peça de ligação da correia com o eixo do cilindro *Bellofram*
- EM-37 Placas de apoio do disco superior
- EM-38 Buchas do disco inferior da câmara
- EM-39 Bucha de ajuste de altura do cilindro *Bellofram*
- EM-40 Prolongamento do eixo do cilindro *Bellofram* de suporte da placa intermediária
- PC-01 Molde CP – anel de base e topo
- PC-02 Molde CP – cilindro do molde
- PC-03 Molde CP – molde interno
- PC-04 Molde CP – varetas para moldagem
- CB-01 Cilindro *Bellofram* pequeno – corte esquemático para montagem

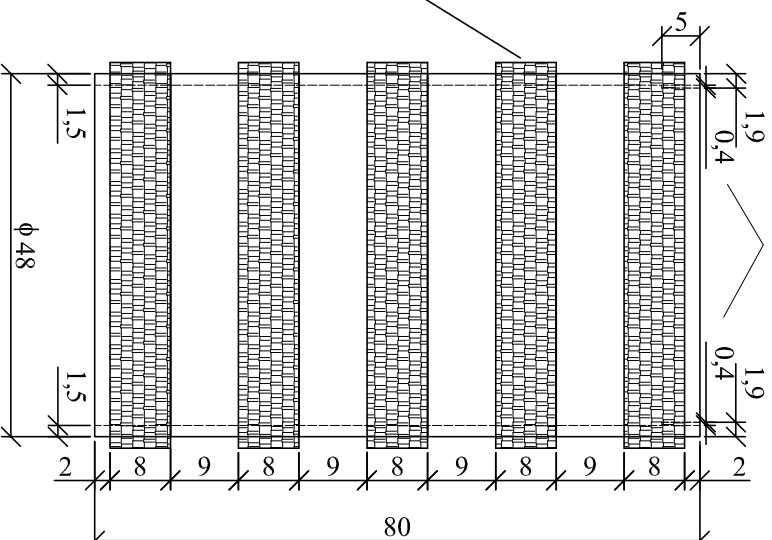
- CB-02 Cilindro *Bellofram* pequeno – peças para montagem: disco superior, cilindro central e placa inferior
- CB-03 Cilindro *Bellofram* pequeno – peças para montagem: disco central, peça central, eixo central e barras laterais
- CB-04 Cilindro *Bellofram* grande – corte esquemático para montagem
- CB-05 Cilindro *Bellofram* grande – peças para montagem: eixo central, barras laterais e cilindro central
- CB-06 Cilindro *Bellofram* grande – peças para montagem: placa superior e placa inferior
- CB-07 Cilindro *Bellofram* grande – peças para montagem: disco central, peça central e bucha para rolamentos lineares

CILINDRO DE ACRÍLICO

Uma peça

alargamento da espessura da parede interna do cilindro com fibra de vidro

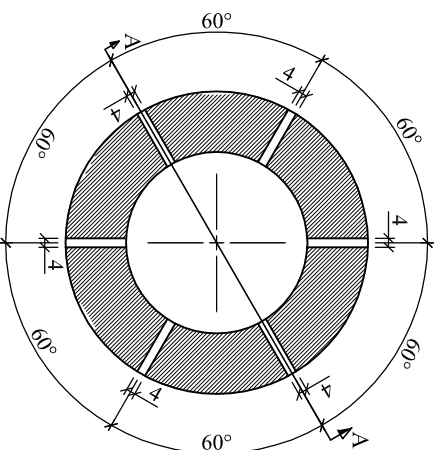
Anéis de reforço em fibra de vidro



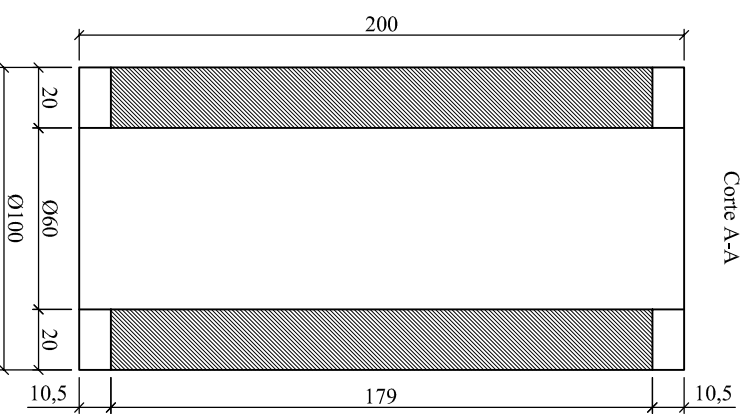
Dimensões em cm
Espessura dos anéis 15mm

Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Cilindro de Acrílico
Detalhamento:	Reforços de fibra de vidro
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Data:	20/03/05
Escala:	1/10
Prancha:	CA-01

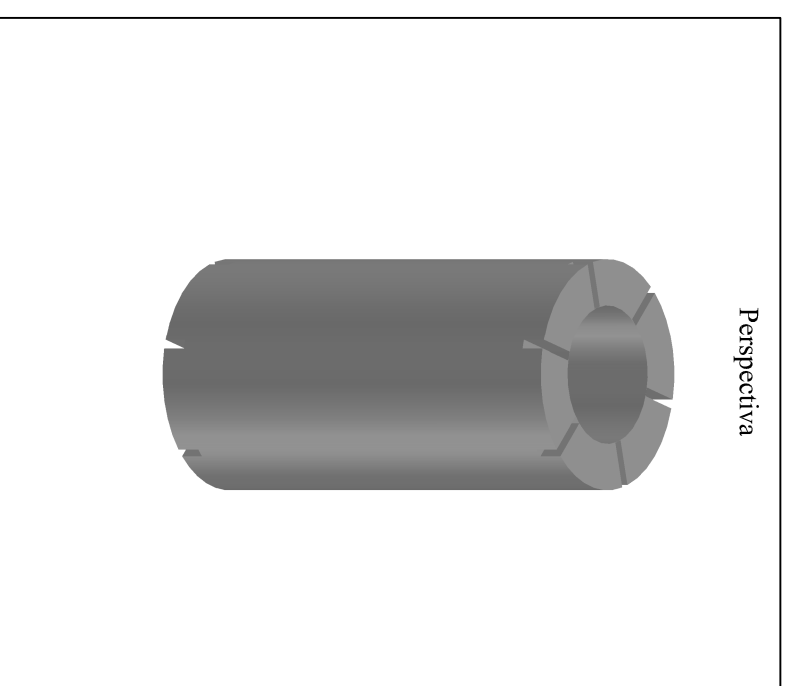
CORPO DE PROVA TESTE EM NYLON
Vista superior



Corte A-A



Cotas e medidas em mm

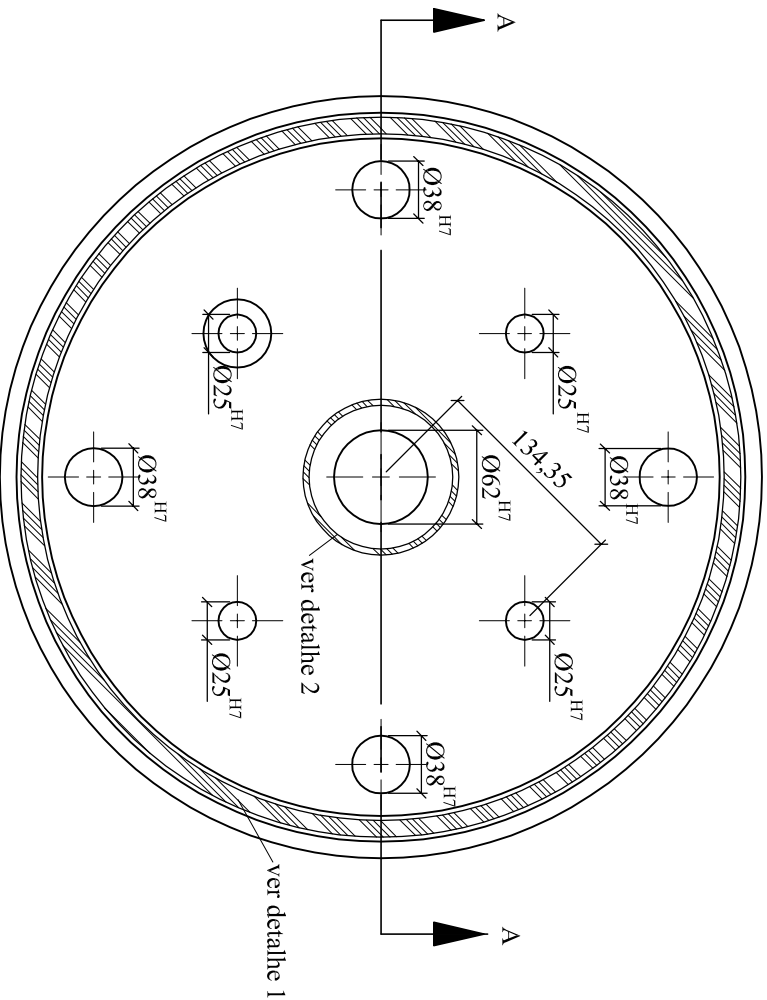


Perspectiva

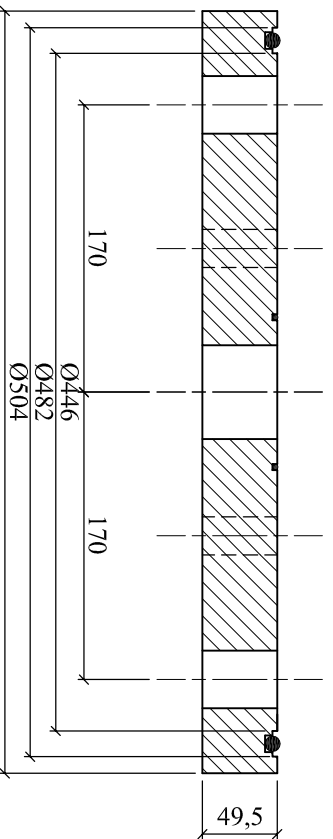
Universidade Federal do Rio Grande do Sul Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapa:	corpo de prova
Detalhamento:	corpo de prova teste
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Data:	17/05/07
Escala:	1/2,5
Prancha:	CP_01

DISCO INFERIOR DA CÂMARA

Vista superior

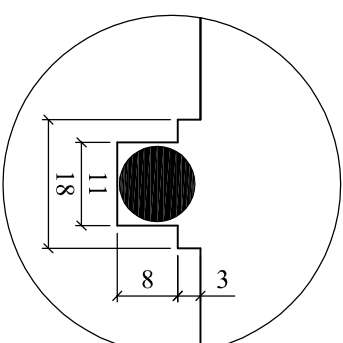


Corte A-A



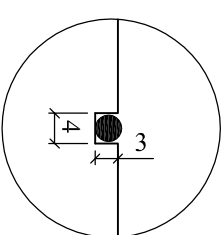
Detalhe 1

Ranhuira para O-ring 10mm



Detalhe 2

Ranhuira para O-ring 2-240



escala 1/1

Acoplamentos recomendados ISO	
Furo base (mm)	H7 (preciso) Afastamento inf (mm) Afastamento sup (mm)
25	0,000 +0,021
38	0,000 +0,025
62	0,000 +0,030

Relação de peças apresentadas nesta prancha

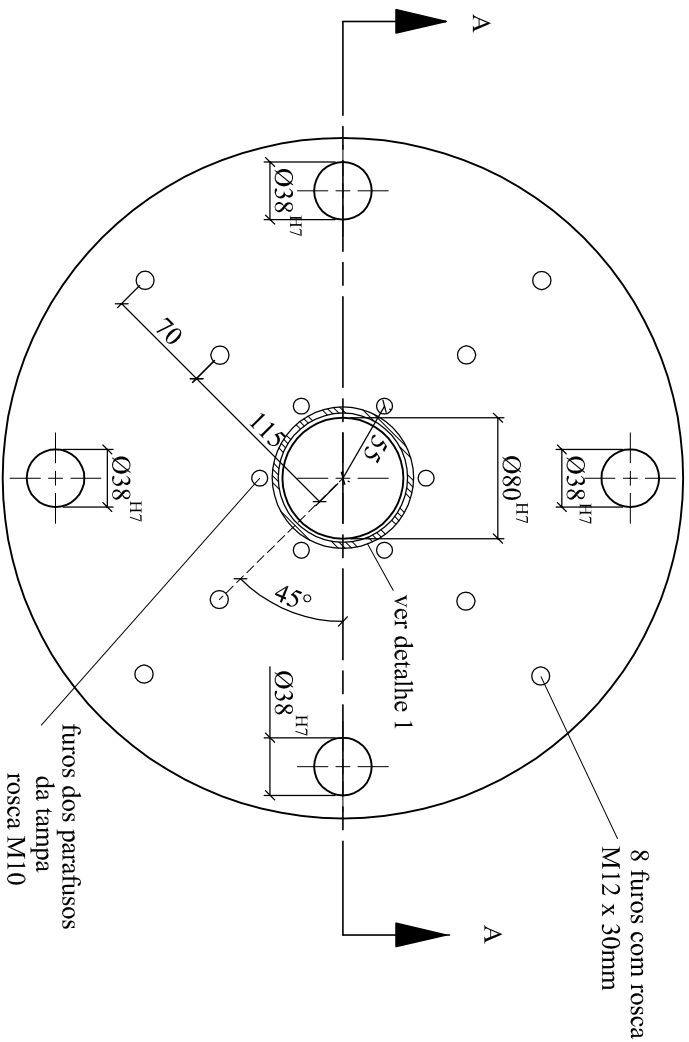
Tipo	Quantidade	Descrição
Disco inferior da câmara	1	placa em aço inox
O-ring 10mm	1	-diâmetro interno: 453mm -espessura: 10mm
O-ring 2-240	1	-diâmetro interno: 94,84mm -espessura: 3,53mm

Dimensões em mm

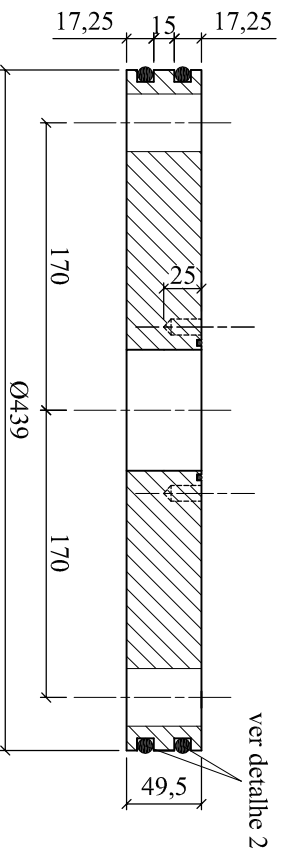
Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Estrutura metálica da câmara
Detalhamento:	Disco inferior da câmara
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Data:	29/08/05
Escala:	1/5
Prancha:	EM-01

DISCO SUPERIOR DA CÂMARA

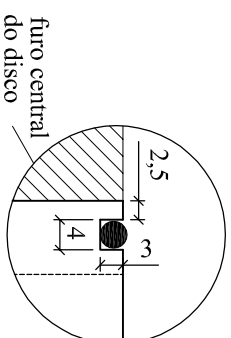
Vista superior



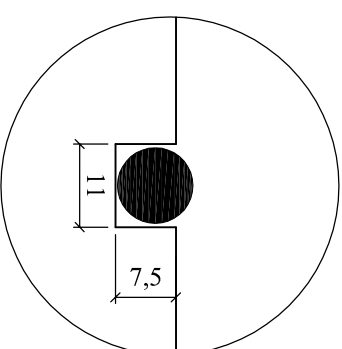
Corte A-A



Detalhe 1
Ranhura para O-ring 2-237



Detalhe 2
Ranhura para O-ring 10mm



escala 1/1

Acoplamentos recomendados ISO	
Furo base (mm)	H7 (preciso)
38	Afastamento inf (mm)
	+0,025
80	Afastamento sup (mm)
	+0,030

Relação de peças apresentadas nesta prancha

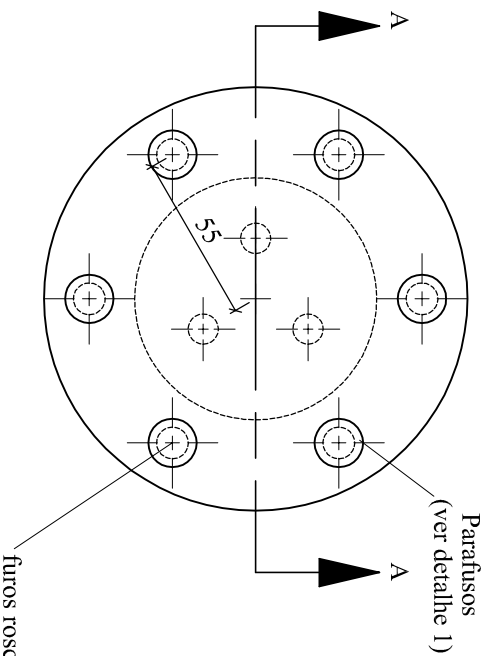
Tipo	Quantidade	Descrição
Disco superior da câmara	1	placa em aço inox
O-ring 2-237	1	-diâmetro interno: 85,32mm -espessura: 3,53mm
O-ring 10mm	2	-diâmetro interno: 427mm -espessura: 10mm

Dimensões em mm

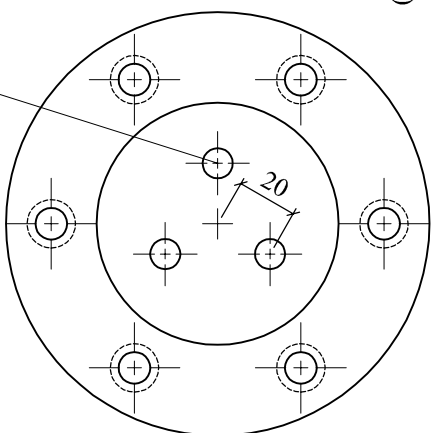
Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapa:	Estrutura metálica da câmara
Detalhamento:	Disco superior da câmara
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Data:	29/08/05
Escala:	1/5
Prancha:	EM-02

TAMPA DO DISCO SUPERIOR DA CÂMARA

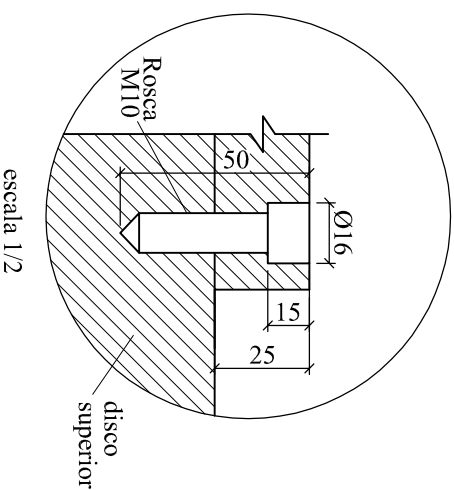
Vista superior



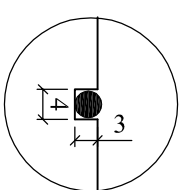
Vista inferior



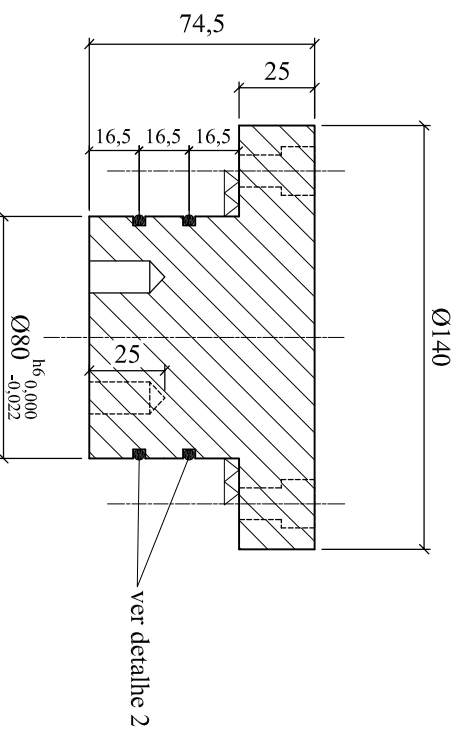
Detalhe 1
Parafuso de fixação
da tampa



Detalhe 2
Ranhuira para O-ring 2-233



Corte A-A



Relação de peças apresentadas
nesta prancha

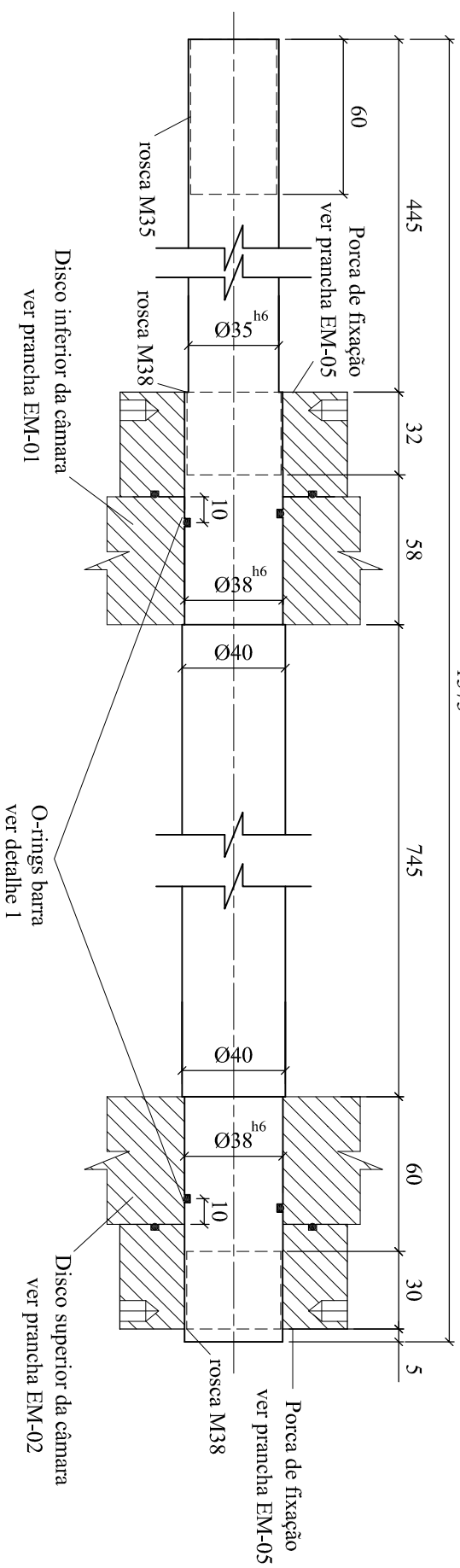
Tipo	Quantidade	Descrição
Tampa do disco superior	1	peça em aço inox
O-ring 2-233	2	-diâmetro interno: 72,62mm -espessura: 3,53mm
Parafusos da tampa	6	

Dimensões em mm

Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapa:	Estrutura metálica da câmara
Detalhamento:	Tampa do disco superior da câmara
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Data:	29/08/05
Escala:	1/2,5
Prancha:	EM-03

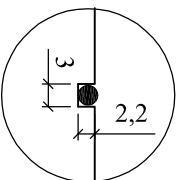
BARRAS DE SUPORTE DA CÂMARA

1375



Detalhe 1

Ranhura para o-rings



escala 1/1

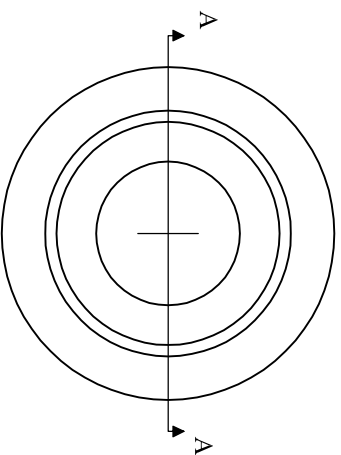
Acoplamentos recomendados ISO	
base (mm)	Eixo h6 (deslizante) afastamento inf (mm) / sup (mm)
35	0,000 / -0,016
38	0,000 / -0,016

Relação de peças apresentadas nesta prancha		
Tipo	Quantidade	Descrição
Barras de suporte da câmara	4	barras em aço inox
O-ring 2-125	8	-diâmetro interno: 32,99mm -espessura: 2,62mm

Dimensões em mm

<p align="center">Universidade Federal do Rio Grande do Sul Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil</p>	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapa:	Data:
Estrutura metálica da câmara	29/08/05
Detalhamento:	Escala:
Barras de suporte da câmara	1/2,5
Responsáveis técnicos:	Prancha:
Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica	EM-04

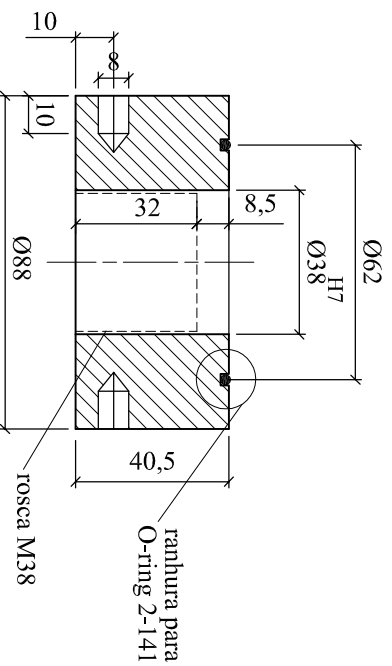
Porca de fixação das placas superior e inferior nas barras de suporte da câmara



Vista superior

Acoplamentos recomendados ISO	
Furo	
base (mm)	H7 (preciso) afastamento sup inf (mm)
38	0,000 +0,025

Corte A-A



Relação de peças apresentadas nesta plancha

Tipo	Quantidade	Descrição
Porcas de fixação dos discos superior e inferior	8	peças em aço inox
O-ring 2-141	8	-diâmetro interno: 58,42mm -espessura: 2,62mm

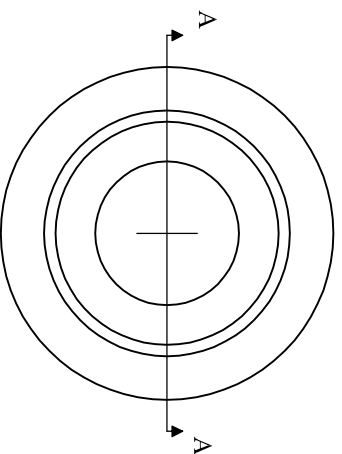
Dimensões em mm

Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Estrutura metálica da câmara
Detalhamento:	Porcas de fixação das barras de suporte
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Data:	29/08/05
Escala:	1/2
Plancha:	EM-05

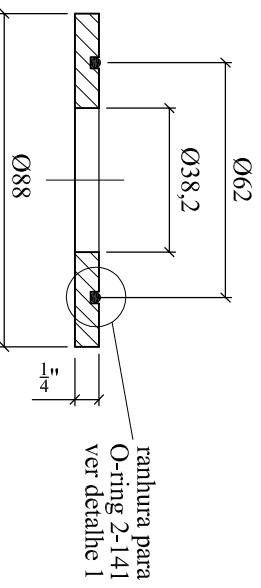
Arruela das porcas de fixação
da placa superior nas
barras de suporte da câmara

4 peças - aço inox

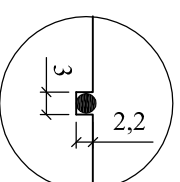
Vista superior



Corte A-A



Detalhe 1
Ranhura para o-ring

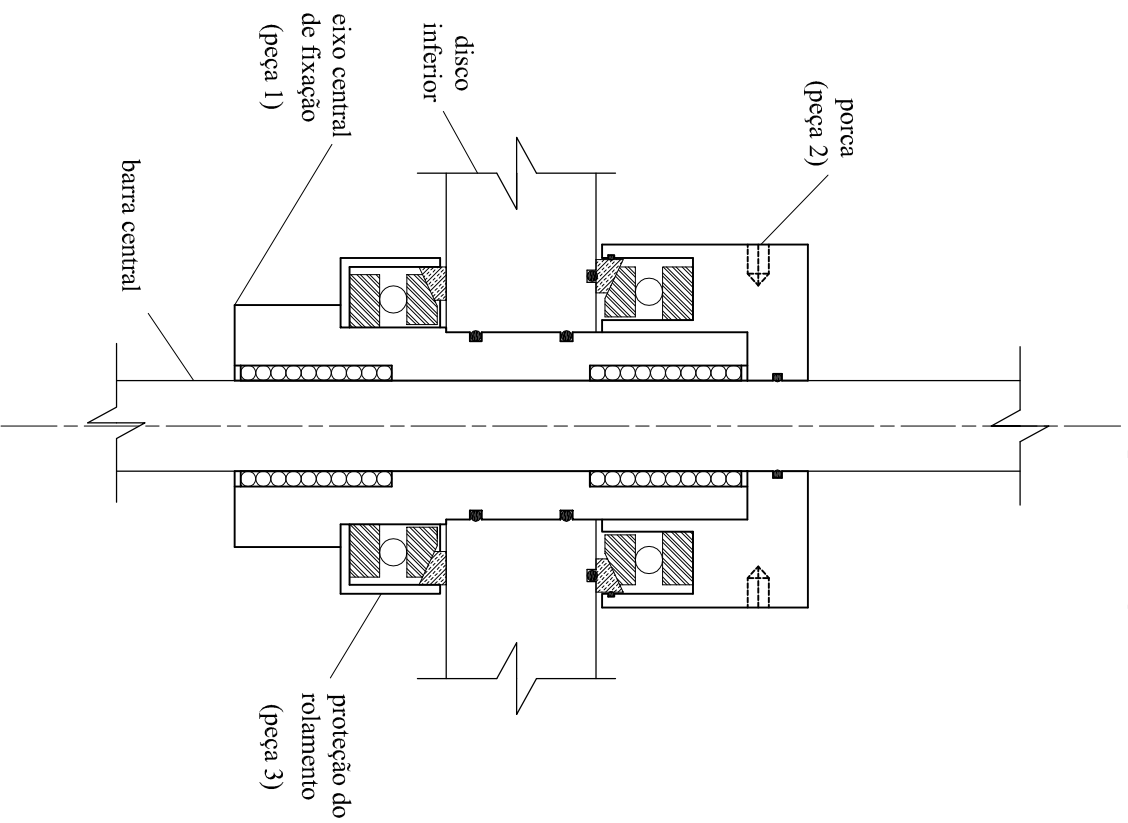


escala 1/1

Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Estrutura metálica da câmara
Detalhamento:	Arruelas das porcas de fixação (topo)
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Data:	17/09/07
Escala:	1/2
Prancha:	EM-05B

PASSAGEM DA BARRA CENTRAL PELO DISCO INFERIOR DA CÂMARA

Corte esquemático para montagem



Peças 1, 2 e 3 detalhadas na prancha EM-07

Relação de peças ilustradas nesta prancha		
Tipo	Quantidade	Descrição
eixo central de fixação	1	peça em aço inox
porca do eixo central	1	peça em aço inox
peça de proteção do rolamento	1	peça em aço comum
O-ring 2-228	2	-diâmetro interno: 56,74mm -espessura: 3,53mm
O-ring 2-123	1	-diâmetro interno: 29,82mm -espessura: 2,62mm
O-ring 2-047	1	-diâmetro interno: 14,02mm -espessura: 1,78mm
rolamento linear	2	di = 30mm de = 40mm h = 50mm
rolamento axial de esferas de escora simples com contraplaca esférica	2	di = 65 e 70mm de = 105 e 110mm h = 32mm (dimensões totais dos conjuntos)

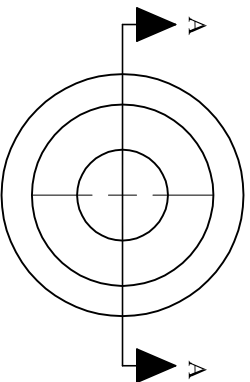
Dimensões em mm

Universidade Federal do Rio Grande do Sul		Projeto:	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil		Equipamento Hollow Cylinder Torsional	
Etapa:	Estrutura metálica da câmara	Data:	29/04/07
Detalhamento:	Fixação da barra central no disco inferior	Escala:	1/2.5
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica	Prancha:	EM-06

PASSAGEM DA BARRA CENTRAL PELO DISCO INFERIOR DA CÂMARA

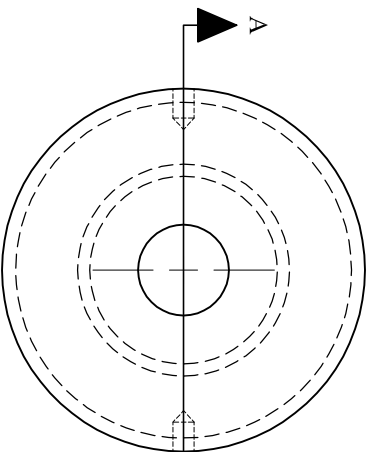
Peça 1 - eixo central de fixação

Vista superior



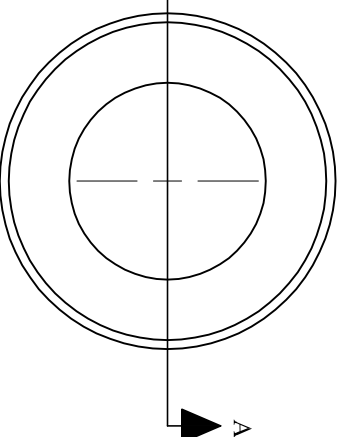
Peça 2 - porca M60

Vista superior

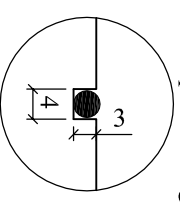


Peça 3 - proteção do rolamento axial (aço comum)

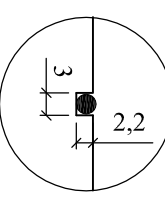
Vista superior



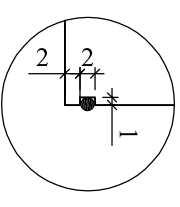
Detalhe 1
Ranhura para O-ring (eixo)



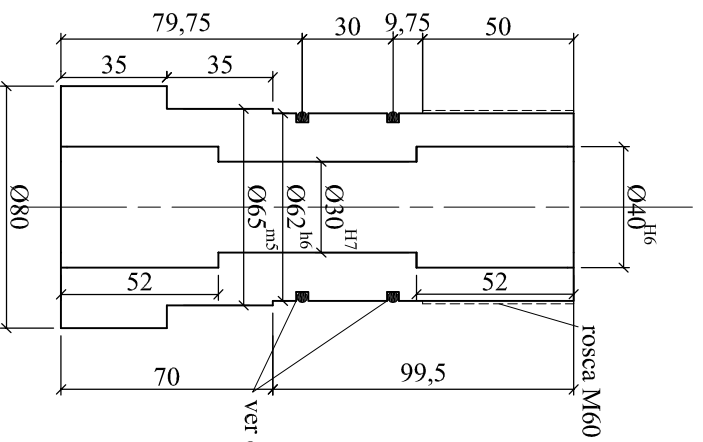
Detalhe 2
Ranhura para O-ring (porca)



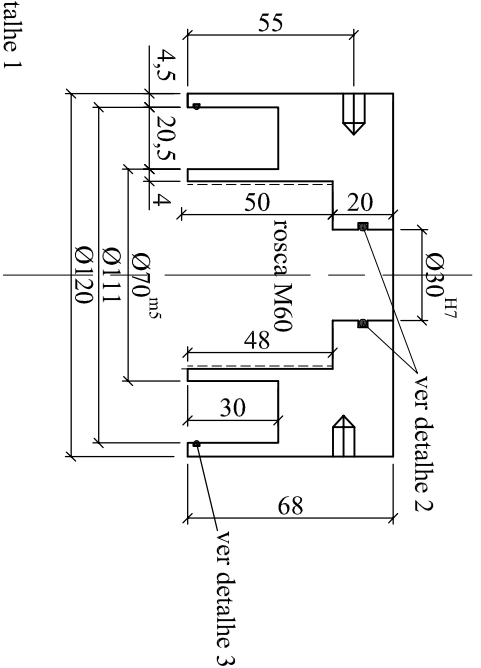
Detalhe 3
Ranhura para O-ring (porca)



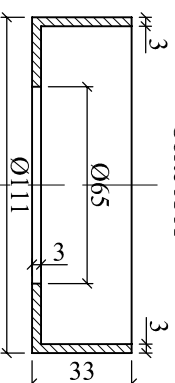
Corte A-A



Corte A-A



Corte A-A



(Detalhamento do disco inferior ver prancha EM - 01)

(Detalhamento do esquema de montagem destas peças ver prancha EM - 06)

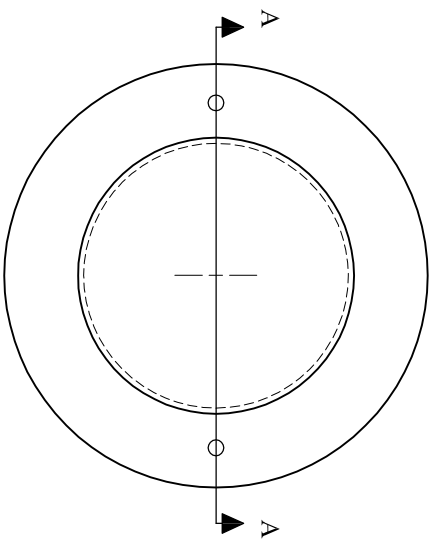
Acoplamentos recomendados ISO		Eixo	
base (mm)	H7 (preciso) afastamento inf (mm)	H6 (extra preciso) afastamento sup (mm)	h6 (deslizante) afastamento sup (mm)
30	0,000 +0,025	-	-
40	-	0,000 +0,016	-
62	-	-	0,000 -0,019
65	-	-	-
70	-	-	-

Dimensões em mm

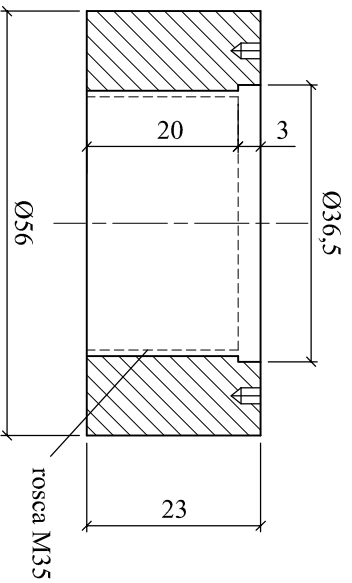
Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Estrutura metálica da câmara
Detalhamento:	Fixação da barra central no disco inferior
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Data:	29/04/07
Escala:	1/2,5
Prancha:	EM-07

Porcas de fixação das barras de suporte da câmara na placa de alumínio da base do equipamento

Vista superior



Corte A-A

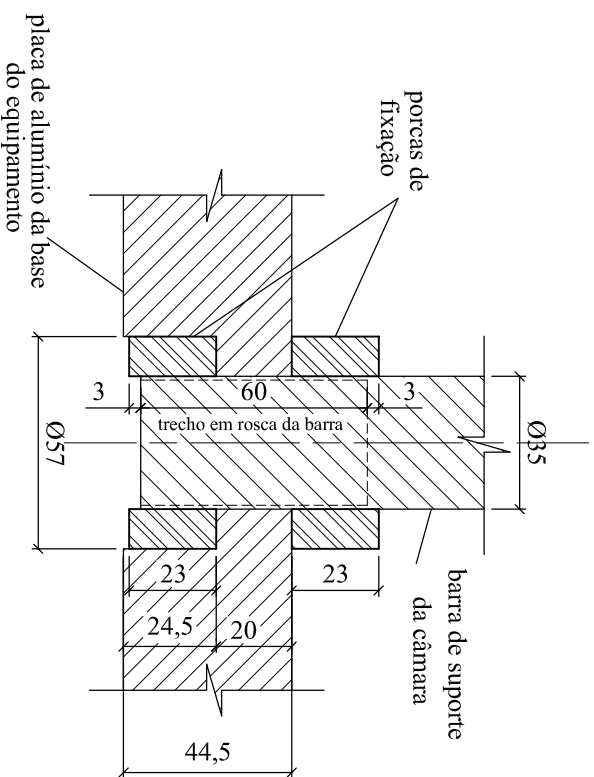


8 peças
aço 1020

escala 1/1

medidas em mm

Esquema de montagem

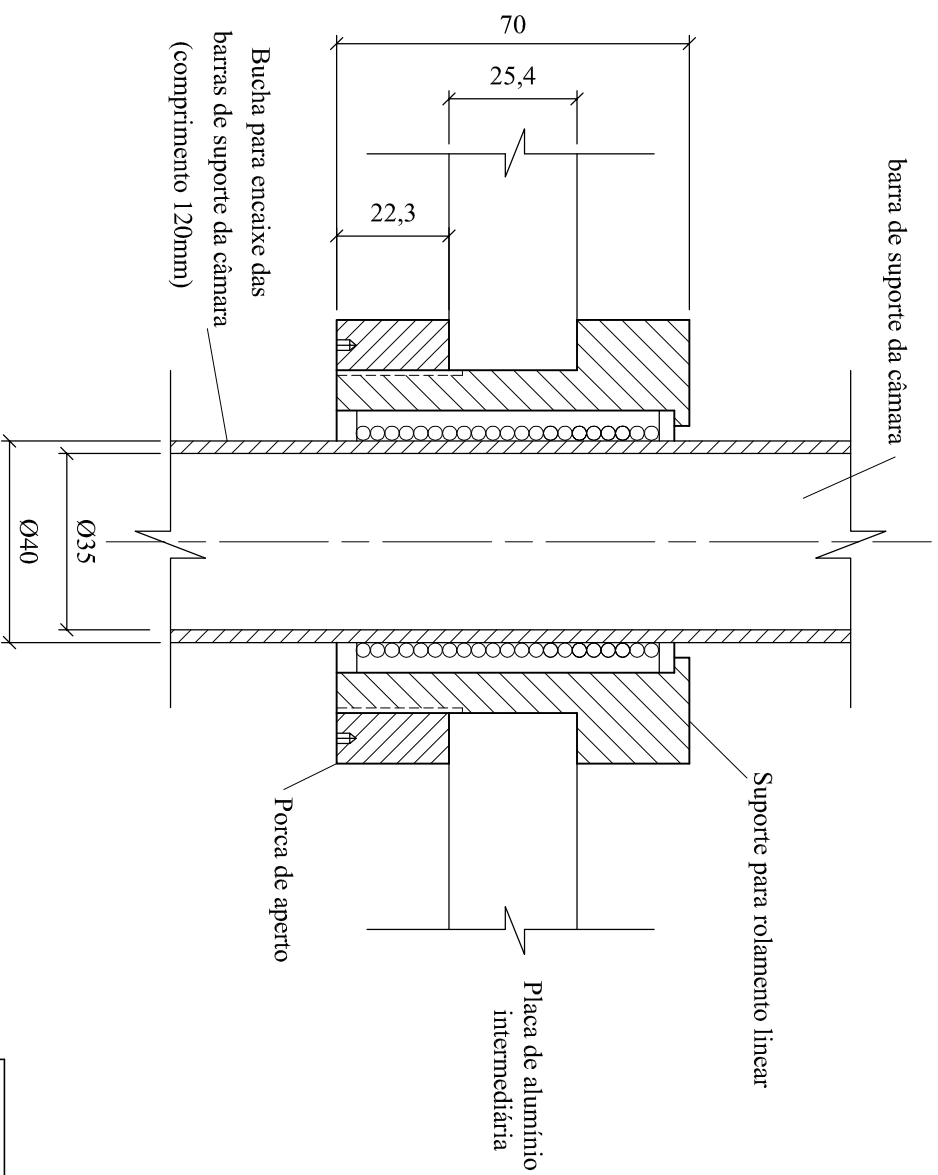


escala 1/2

Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Data:
Estrutura metálica da câmara	27/05/06
Detalhamento:	Escala:
Fixação das barras na placa de base	indicada
Responsáveis técnicos:	Prancha:
Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica	EM-08

Peças para fixação do rolamento linear na placa de alumínio intermediária

Esquema de montagem



Detalhamento das peças da prancha EM-10

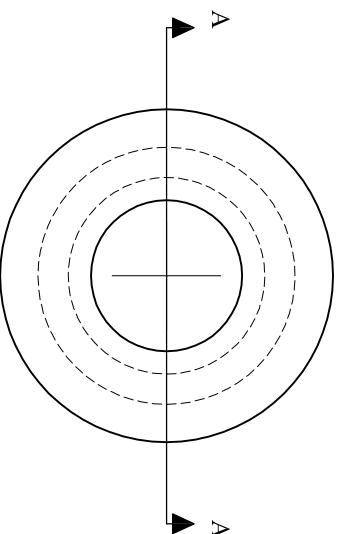
Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Data:
Estrutura metálica da câmara	27/05/06
Detalhamento:	Escala:
Fixação rolamento linear na placa intermediária	1/1,5
Responsáveis técnicos:	Prancha:
Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica	EM-09

Peças para fixação do rolamento linear na placa de alumínio intermediária

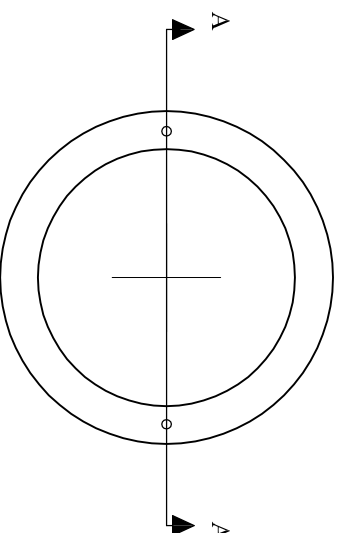
Suporte para rolamento linear

Porca de aperto

Vista superior



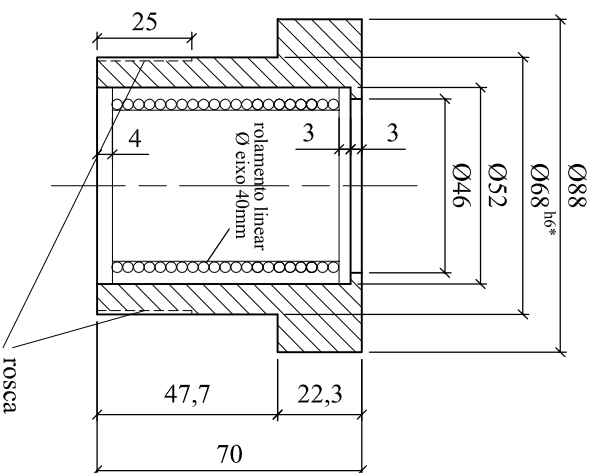
Vista superior



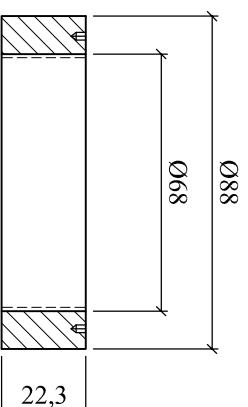
2 peças de cada

em aço inox

Corte A-A



Corte A-A



*Precisão h6 - 0,000
-0,019

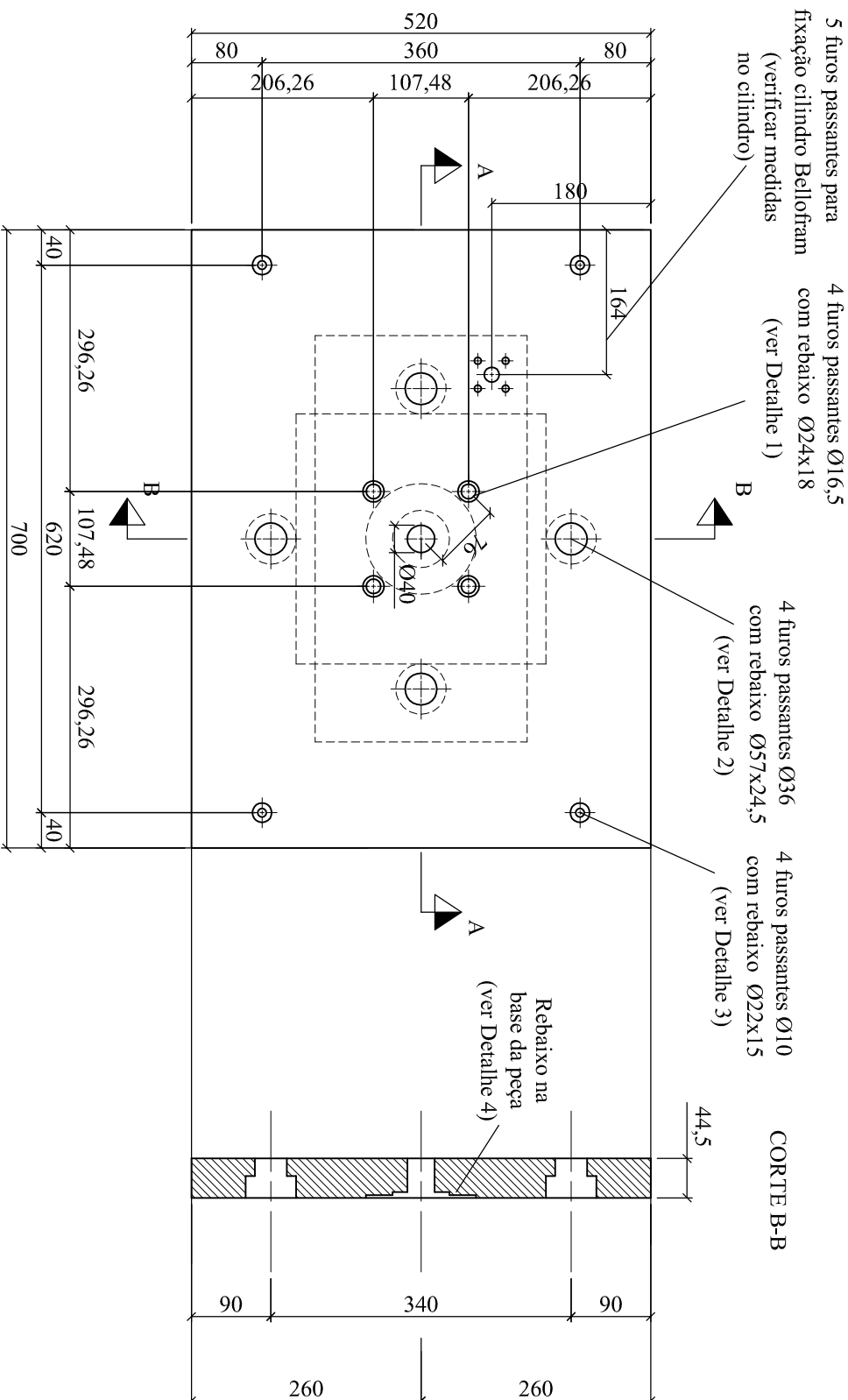
Dimensões em mm

Esquema de montagem - ver prancha EM-09

<p align="center">Universidade Federal do Rio Grande do Sul Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil</p>	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Estrutura metálica da câmara
Detalhamento:	Fixação rolamento linear na placa intermediária
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Data:	27/05/06
Escala:	1/2
Prancha:	EM-10

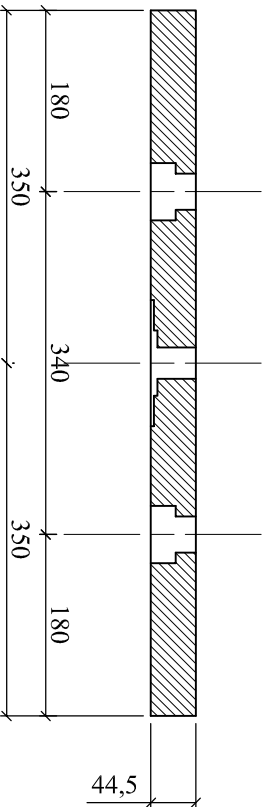
PLACA DE ALUMINIO DA BASE DA CÂMARA

VISTA SUPERIOR



CORTE B-B

CORTE A-A

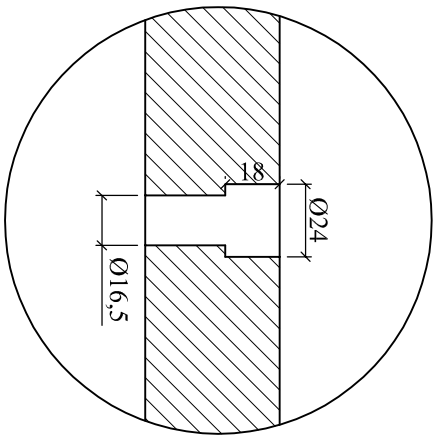


Cotas e medidas em mm

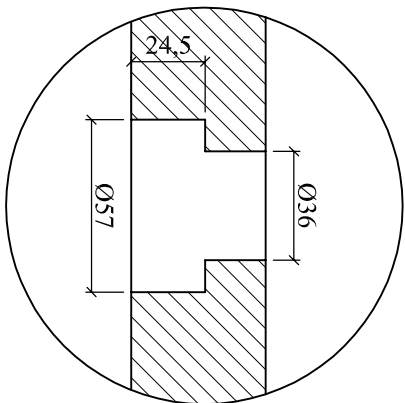
Detalhes na prancha EM-12

Universidade Federal do Rio Grande do Sul Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Elaborar:	Data: 17/01/06
Detalhamento:	Escala: 1/7,5
Placa de base do equipamento	
Responsáveis técnicos:	
Juliana de A. Bernardes,	Adriano V. D. Bica
Prancha: EM-11	

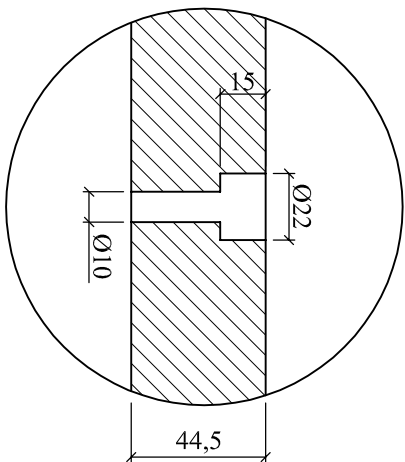
Detalhe 1
4 furos passantes Ø16,5
com rebaixo Ø24x18



Detalhe 2
4 furos passantes Ø36
com rebaixo Ø57x24,5

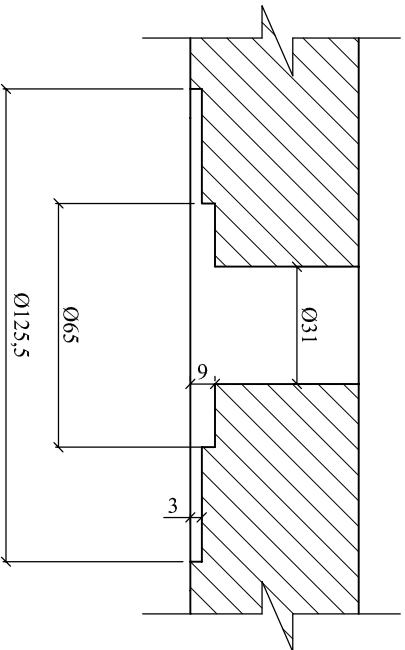


Detalhe 3
4 furos passantes Ø10
com rebaixo Ø22x15



Escala 1/2.5

Detalhe 4
Rebaixo na
base da peça



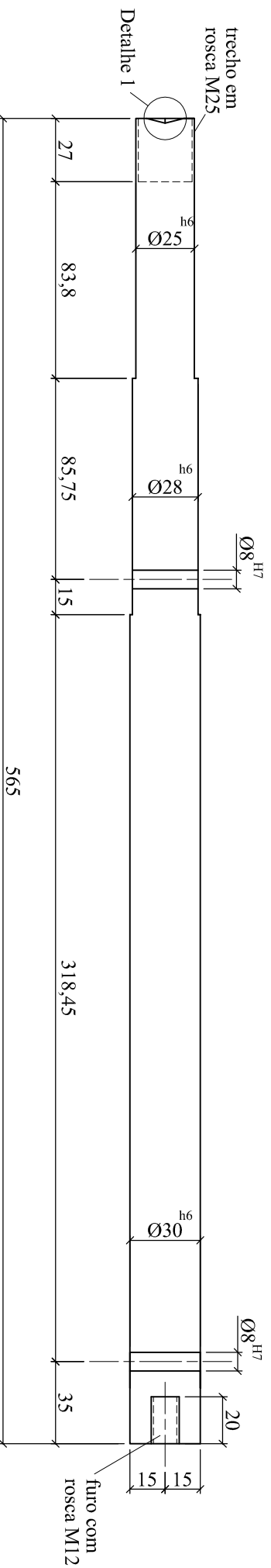
Escala 1/2

Cotas e medidas em mm

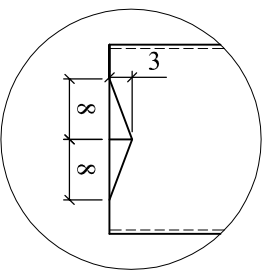
<p>Universidade Federal do Rio Grande do Sul Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil</p>	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapa:	Estrutura metálica da câmara
Detalhamento:	Detalhes da placa de base do equipamento
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Data:	17/01/06
Escala:	indicada
Prancha:	EM-12

BARRA CENTRAL

1 peça
aço inox



Detalle 1



escala 1/1

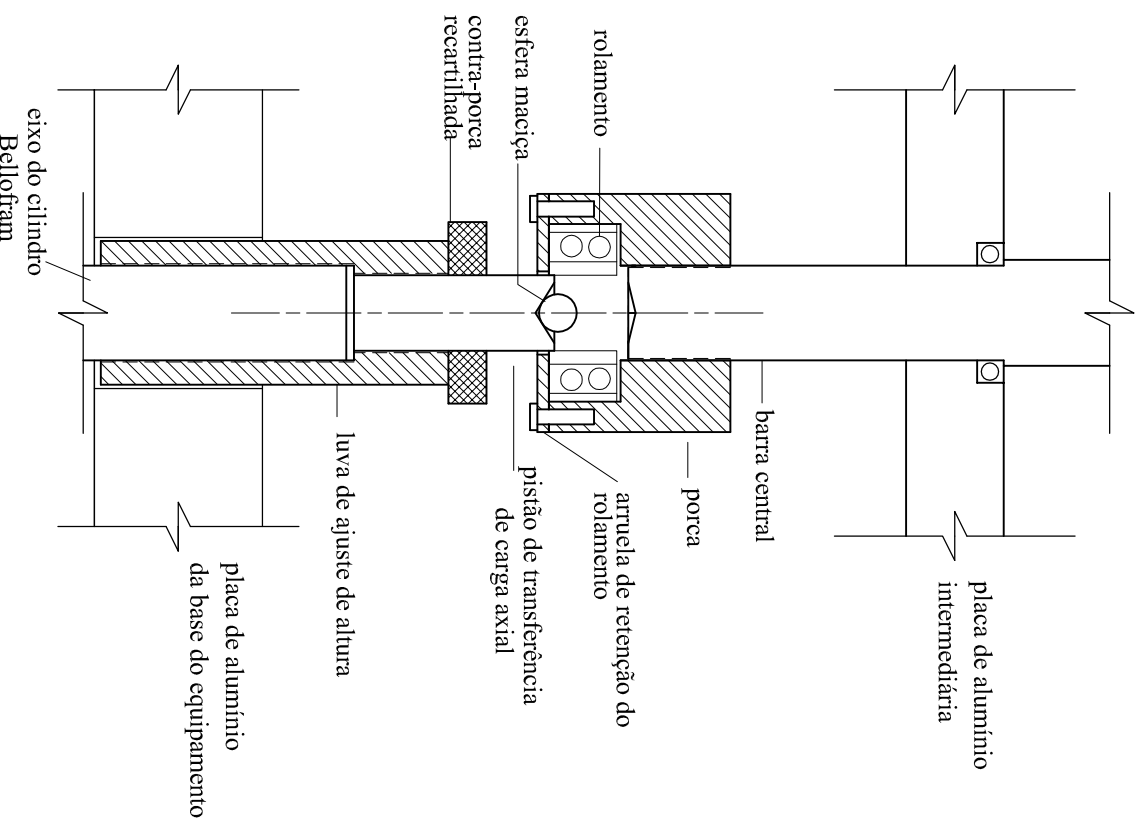
Acoplamentos recomendados ISO		
	Furo	Eixo
base (mm)	H7 (preciso) afastamento inf (mm)	h6 (preciso) afastamento sup (mm)
8	0,000 +0,015	-
25, 28, 30	-	0,000 -0,013

Dimensões em mm

<p align="center">Universidade Federal do Rio Grande do Sul Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil</p>	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapa:	Estrutura metálica da câmara
Detalhamento:	Barra central
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Data:	20/07/06
Escala:	1/2,5
Prancha:	EM-13

PEÇAS DE FIXAÇÃO DA BARRA CENTRAL NO EIXO DO CILINDRO BELLOFRAM

Esquema de montagem



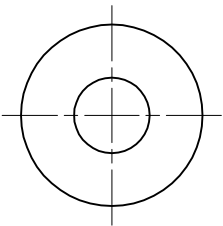
Detalhamento das peças na prancha EM-15

Universidade Federal do Rio Grande do Sul Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil		Projeto: Equipamento Hollow Cylinder Torsional	
Etapa: Estrutura metálica da câmara	Data: 20/07/06	Detalhamento: Fixação da barra central no eixo do Bellofram	
Responsáveis técnicos: Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica		Escala: 1/2	Prancha: EM-14

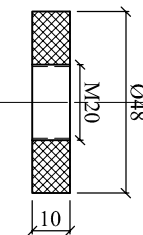
PEÇAS DE FIXAÇÃO DA BARRA CENTRAL
NO EIXO DO CILINDRO BELLOFRAM

Contra-porca
recarilhada

Vista superior

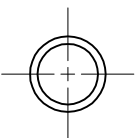


Corte

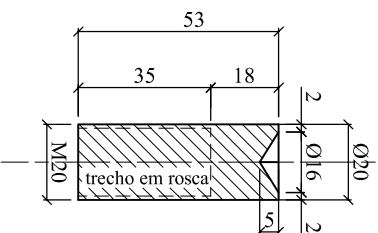


Pistão de transferência
de carga axial

Vista superior

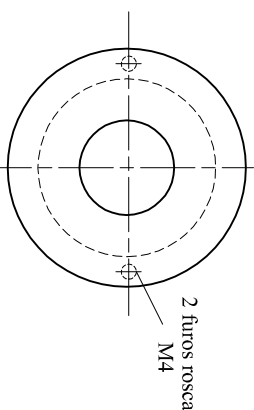


Corte

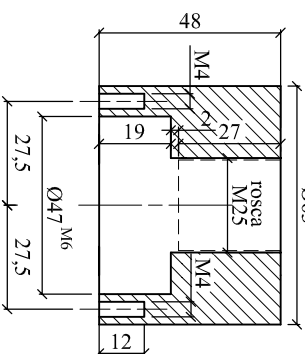


Porca

Vista superior

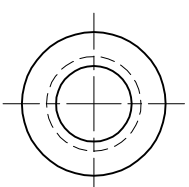


Corte

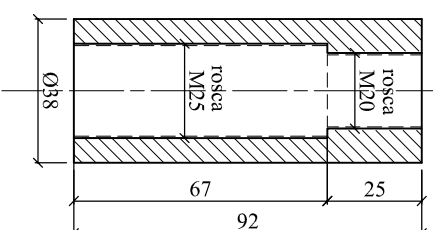


Luva de ajuste de altura

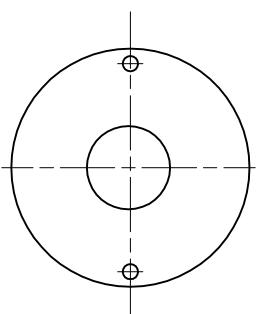
Vista superior



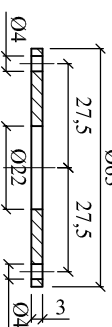
Corte



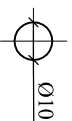
Arruela de retenção do rolamento
Vista superior



Corte



Esfera maciça

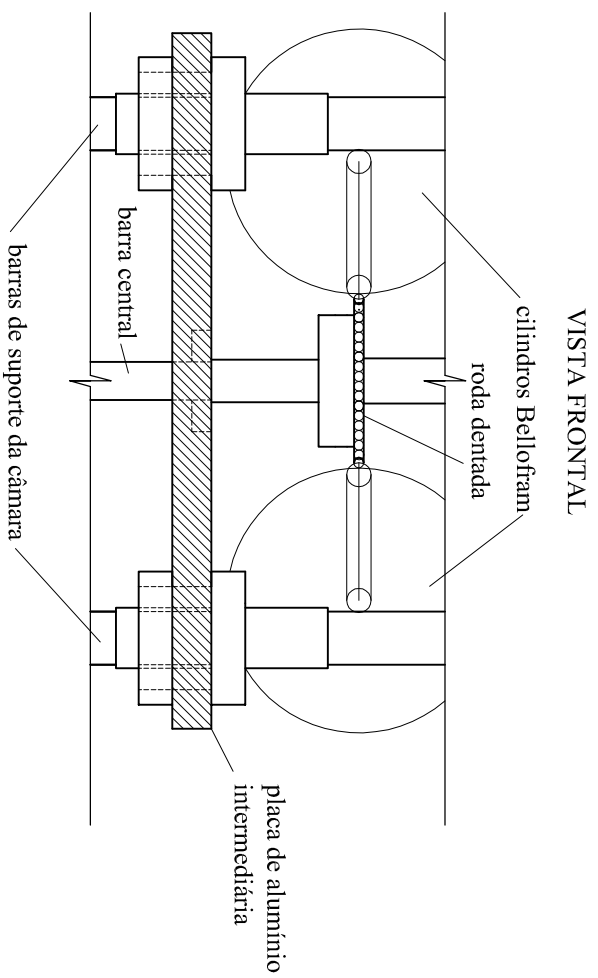
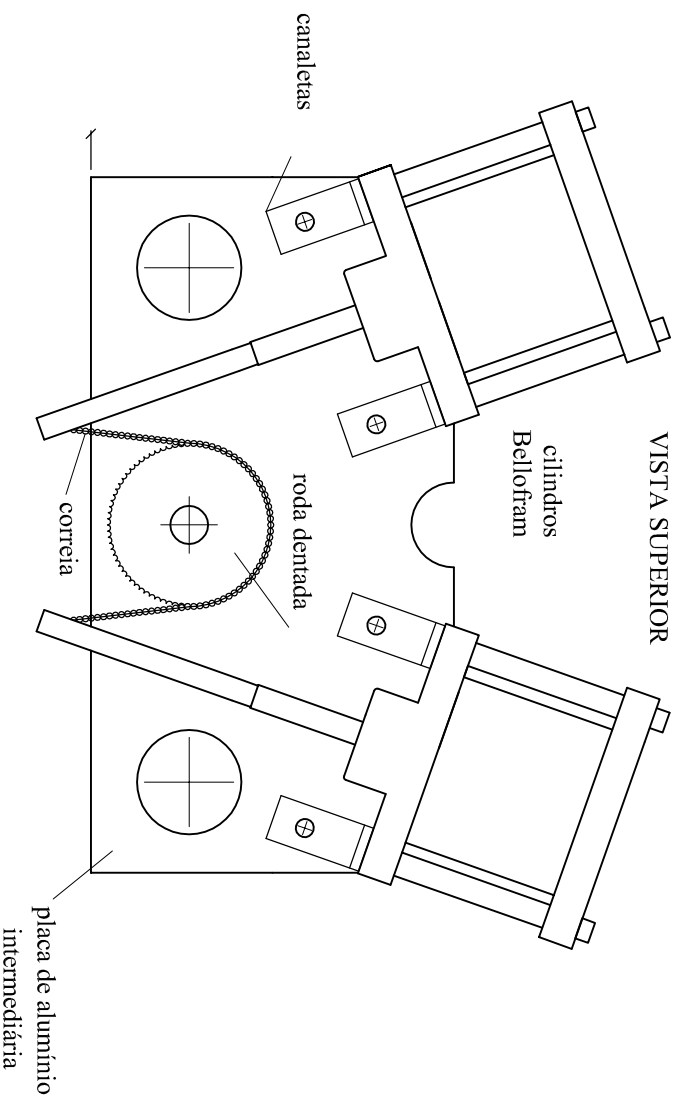


Esquema de montagem das peças na prancha EM-14
dimensões em mm

Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapa:	Estrutura metálica da câmara
Detalhamento:	Fixação da barra central no eixo do Bellofram
Responsáveis técnicos:	Prancha: EM-15
Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica	
Data:	20/07/06
Escala:	1/2

PLACA DE ALUMÍNIO INTERMEDIÁRIA

ESQUEMA DE MONTAGEM

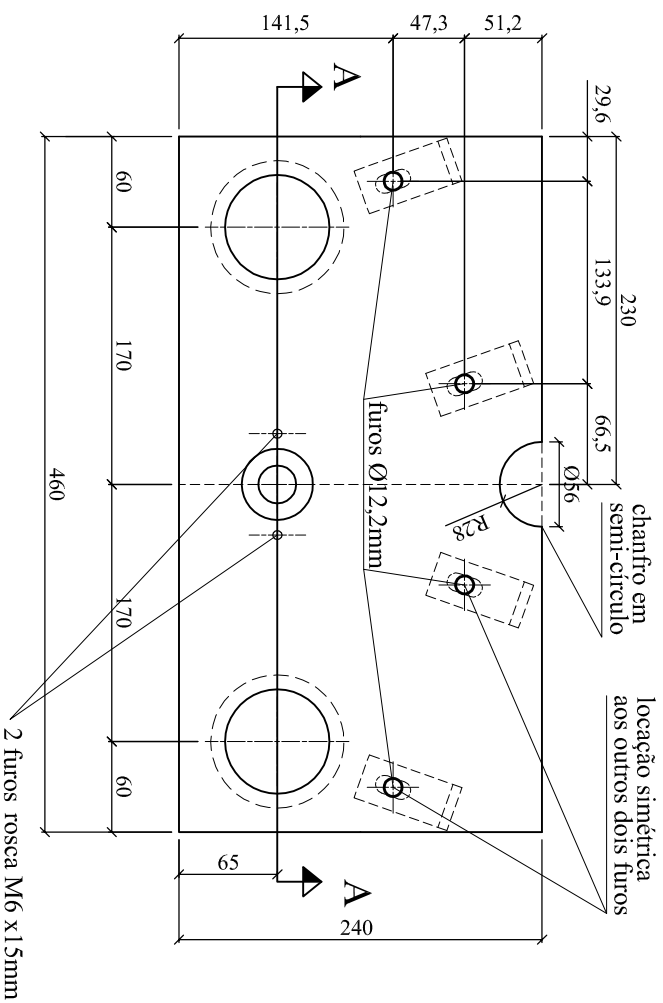


Cotas e medidas em mm

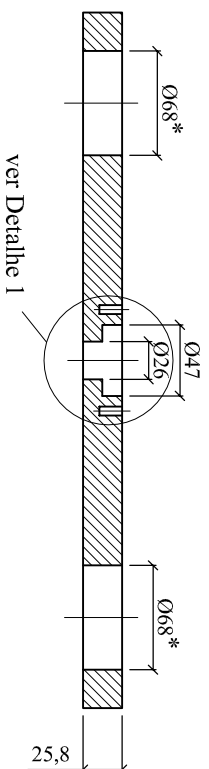
Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapa:	Data:
Estrutura metálica da câmara	17/01/06
Detalhamento:	Escala:
esquema de montagem da placa intermediária	1/5
Responsáveis técnicos:	Prancheta:
Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica	EM-16

PLACA DE ALUMÍNIO INTERMEDIÁRIA

VISTA SUPERIOR

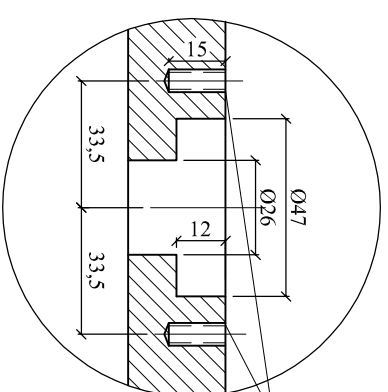


CORTE A-A



* ajuste deslizante (para buchas de fixação dos rolamentos lineares)

Detalhe 1 Fixação do rolamento



furos com rosca M6
(furos para fixação do anel
de retenção do rolamento
ver prancha EM-18)

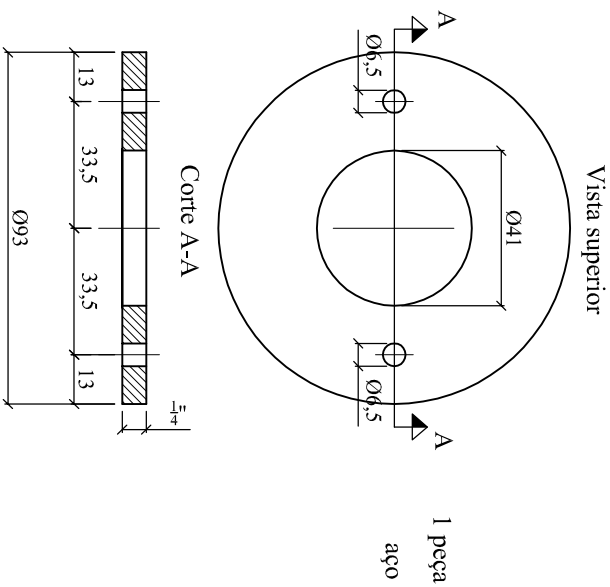
escala 1/2

Cotas e medidas em mm

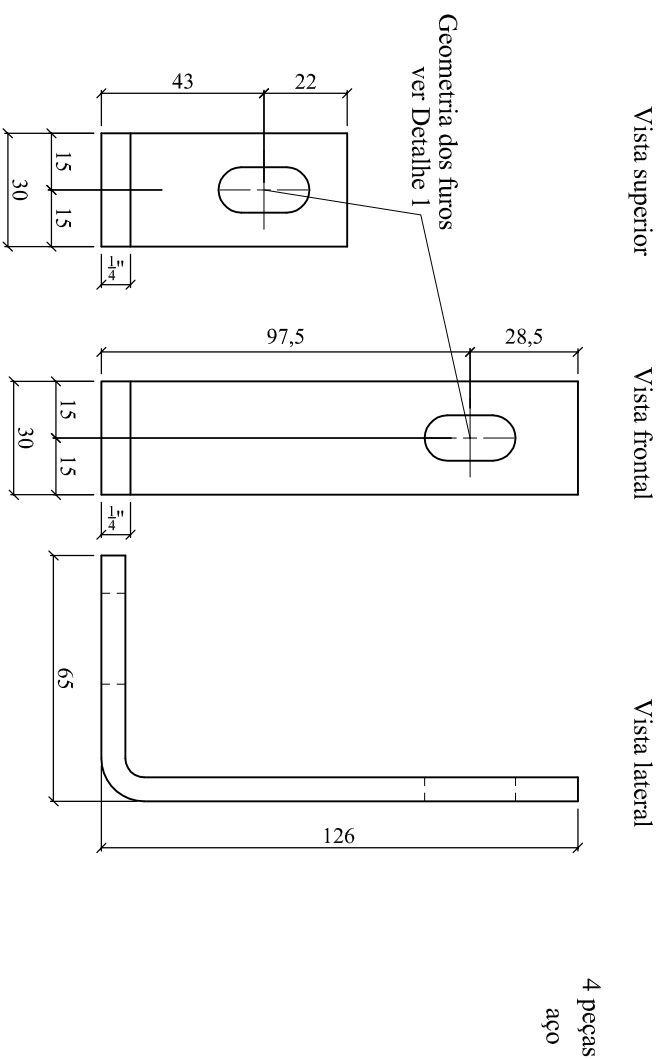
Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Elaborar:	Data:
Estrutura metálica da câmara	17/01/06
Detalhamento:	Escala:
Placa intermediária	1/5
Responsáveis técnicos:	Prancha:
Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica	EM-17

PEÇAS DE FIXAÇÃO DE ELEMENTOS NA
PLACA DE ALUMÍNIO INTERMEDIÁRIA

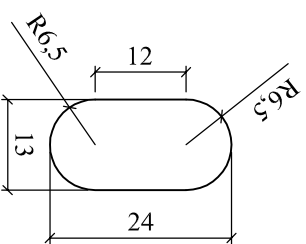
Anel para retenção do rolamento
linear na placa de alumínio



Canaletas para fixação dos cilindros Bellofram



furos alargados
para fixação dos
cilindros Bellofram

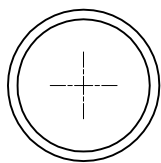


Cotas e medidas em mm

<p>Projeto: Equipamento Hollow Cylinder Torsional</p>	
<p>Universidade Federal do Rio Grande do Sul Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil</p>	
<p>Etapas:</p>	<p>Data:</p>
<p>Estrutura metálica da câmara</p>	<p>17/01/06</p>
<p>Detalhamento:</p>	<p>Escala:</p>
<p>fixação de peças da placa intermediária</p>	<p>1/2</p>
<p>Responsáveis técnicos:</p>	<p>Prancha:</p>
<p>Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica</p>	<p>EM-18</p>

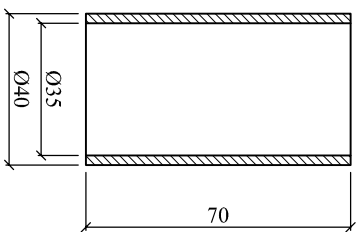
Bucha para instalação dos rolamentos lineares
nas barras de suporte da câmara

Vista superior

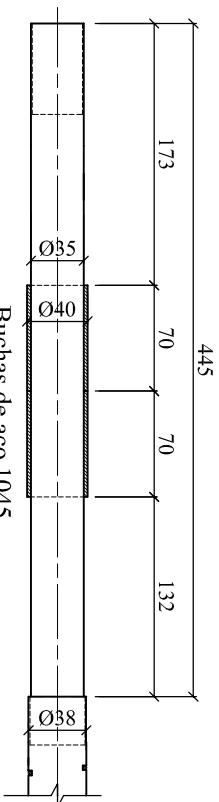


4 peças
aço 1045

Corte



Posição da bucha na barra de suporte

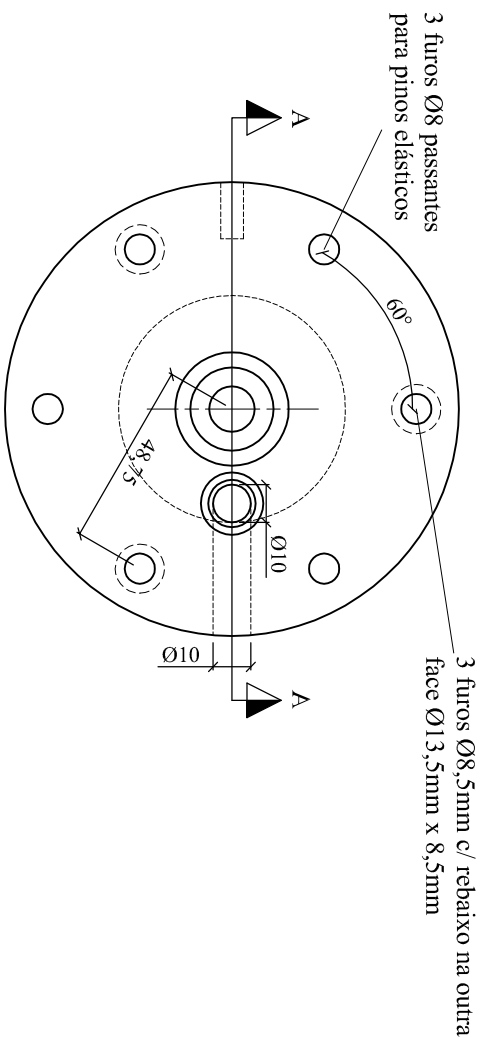


Cotas e medidas em mm

Projeto: Universidade Federal do Rio Grande do Sul Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Equipamento Hollow Cylinder Torsional	
Etapa: Estrutura metálica da câmara	Data: 17/01/06
Detalhamento: buchas das barras de suporte	Escala: 1/2
Responsáveis técnicos: Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica	Prancha: EM-19

BASE DO PEDESTAL DO CORPO DE PROVA

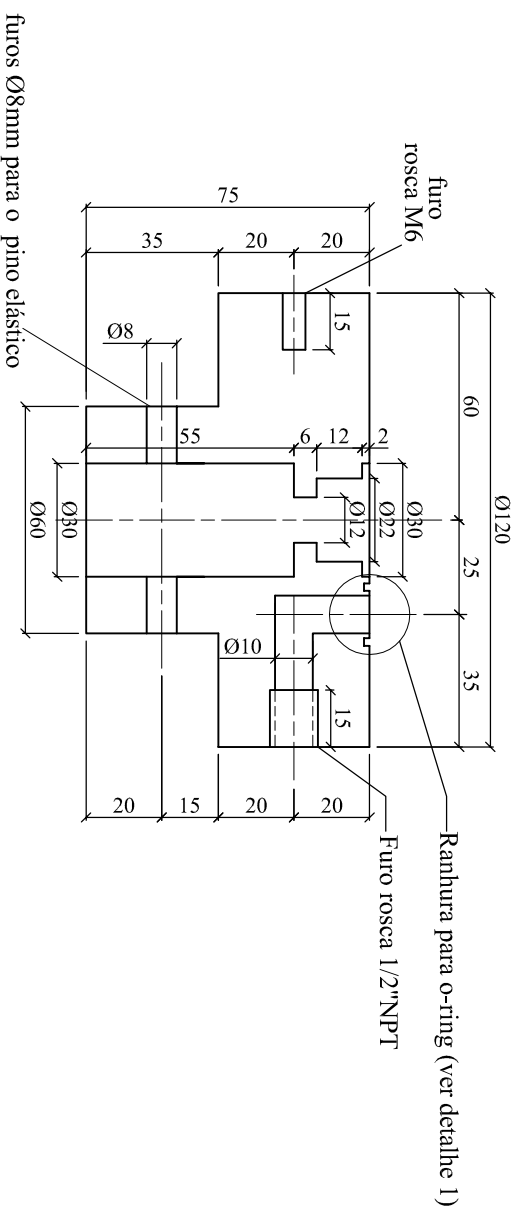
Vista superior



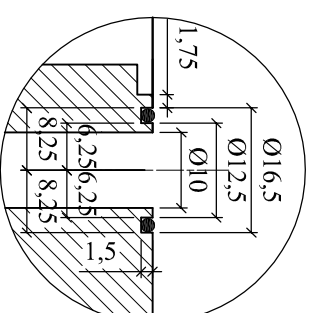
1 peça
aço inox

Os dois tipos de furos devem ser intercalados

Corte A-A



Detalhe 1
Ranhura para O-ring



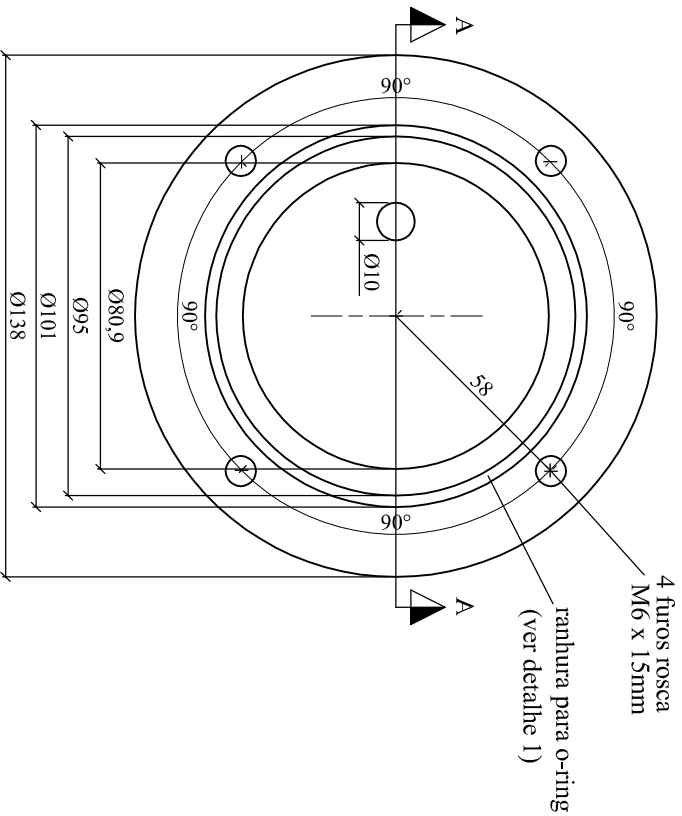
Detalhes do o-ring:
código: 2-014
di: 12,42mm
e: 1,78mm

Cotas e medidas em mm

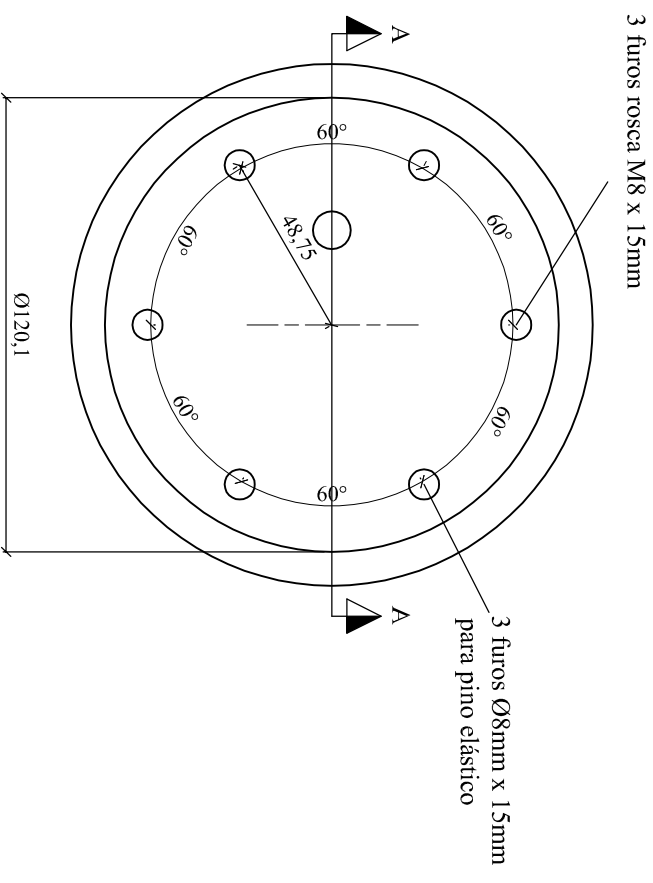
Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapa:	Estrutura metálica da câmara
Detalhamento:	Base do pedestal do corpo de prova
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Data:	20/07/06
Escala:	1/2
Prancha:	EM-20

PEÇA INTERMEDIÁRIA ENTRE A BASE E O PEDESTAL DO CORPO DE PROVA

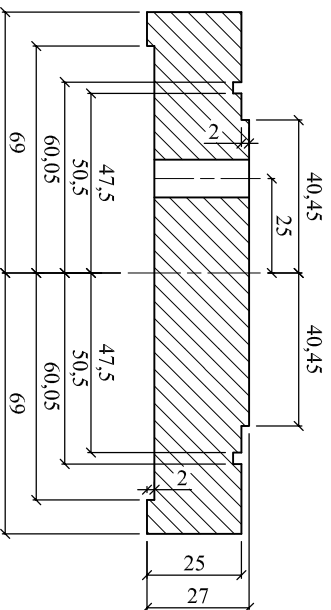
Vista superior



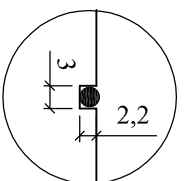
Vista inferior



Corte A-A



Detalhe 1
Ranhura para O-ring

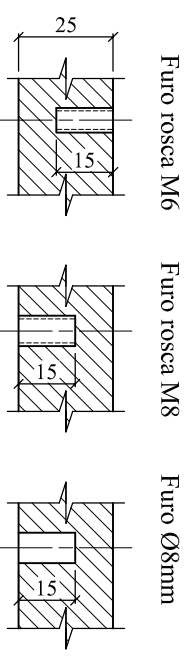


escala 1/1

Detalhes do o-ring:

código: 2-154
di: 94,92mm
e: 2,62mm

Detalhe em corte dos furos



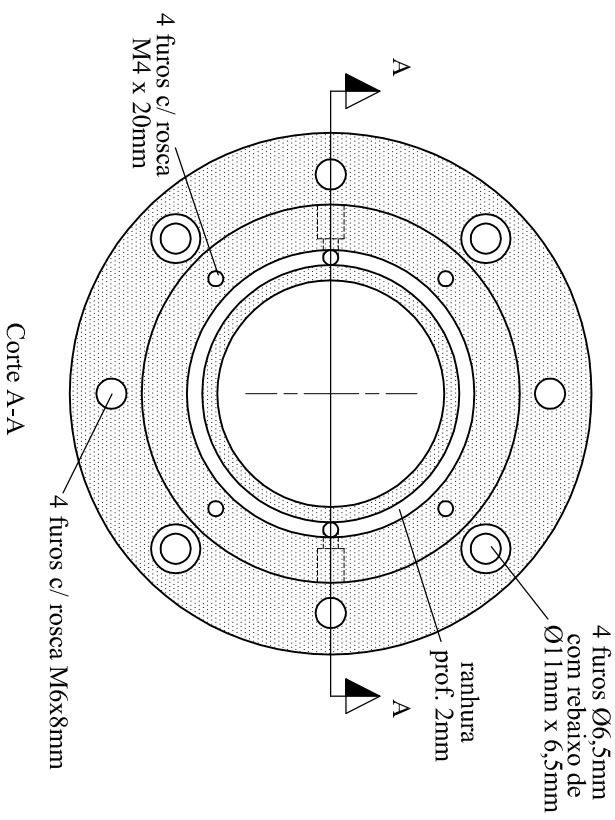
Todos os furos desta peça devem concordar com seus respectivos encaixes na base do pedestal e no pedestal (ver pranchas EM-20 e EM-21)

1 peça - aço inox
Cotas e medidas em mm

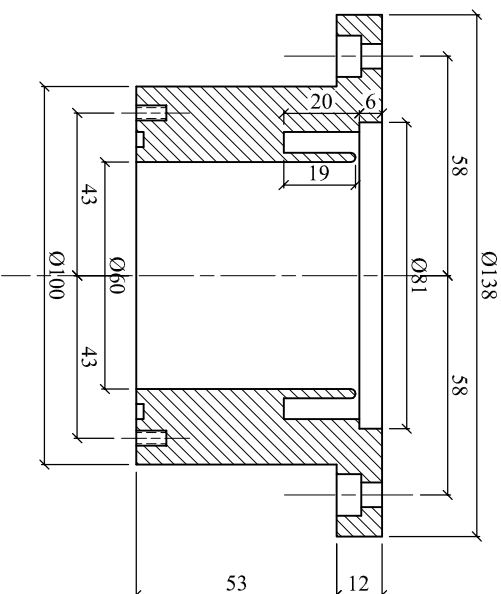
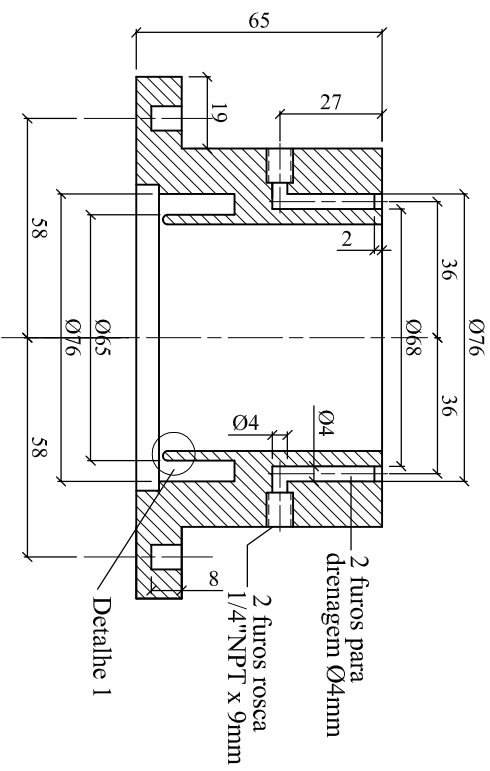
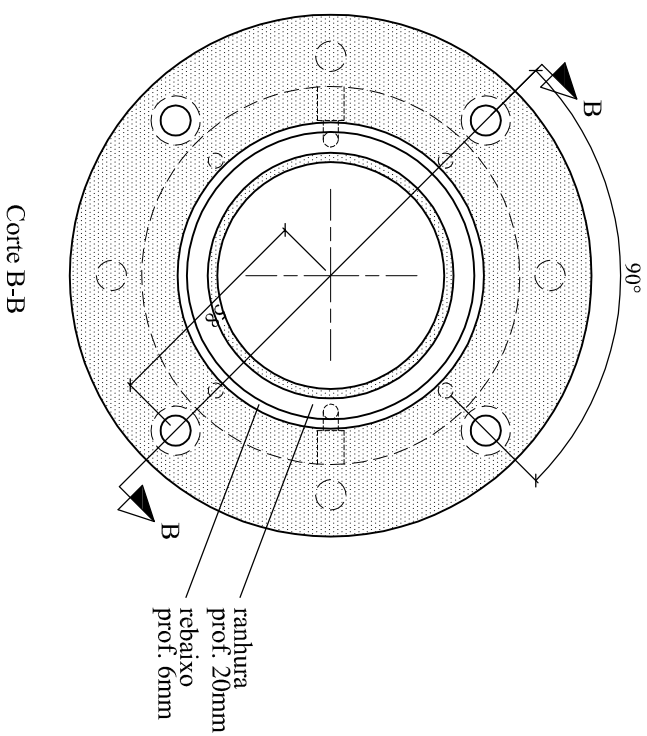
Universidade Federal do Rio Grande do Sul		Data:	13/03/07
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil		Escala:	1/2
Projeto: Equipamento Hollow Cylinder Torsional		Prancha:	EM-21
Etapa: Estrutura metálica da câmara			
Detalhamento: Peça intermediária entre a base e o pedestal			
Responsáveis técnicos: Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica			

PEDESTAL DO CORPO DE PROVA

Vista superior



Vista inferior



1 peça - aço inox

Cotas e medidas em mm

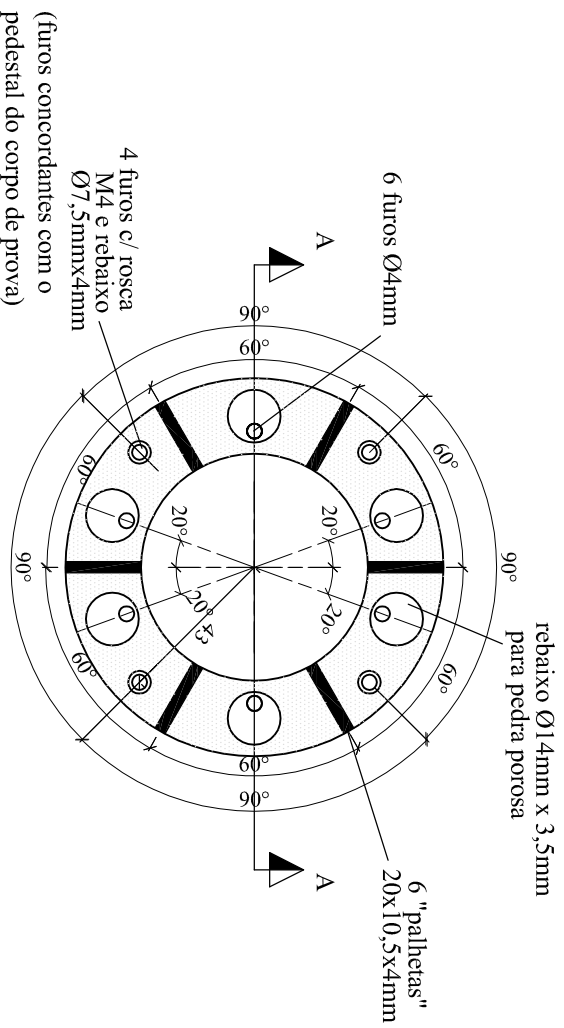
Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Estrutura metálica da câmara
Detalhamento:	Pedestal do corpo de prova
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Data:	20/01/07
Escala:	1/2
Prancha:	EM-22

2 peças - aço comum

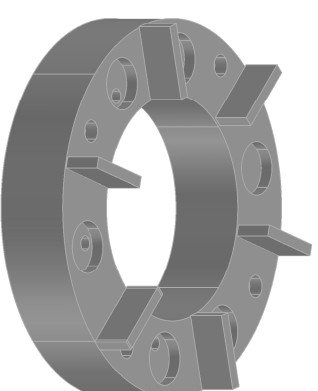
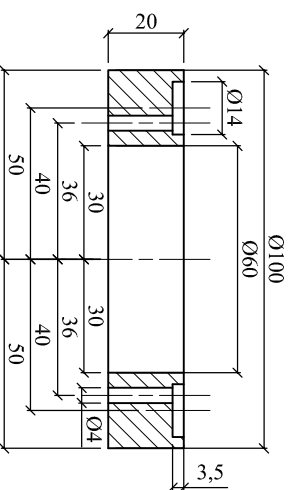
Perspectiva isométrica

BASE E TOPO DO CORPO DE PROVA

Vista superior



Corte AA

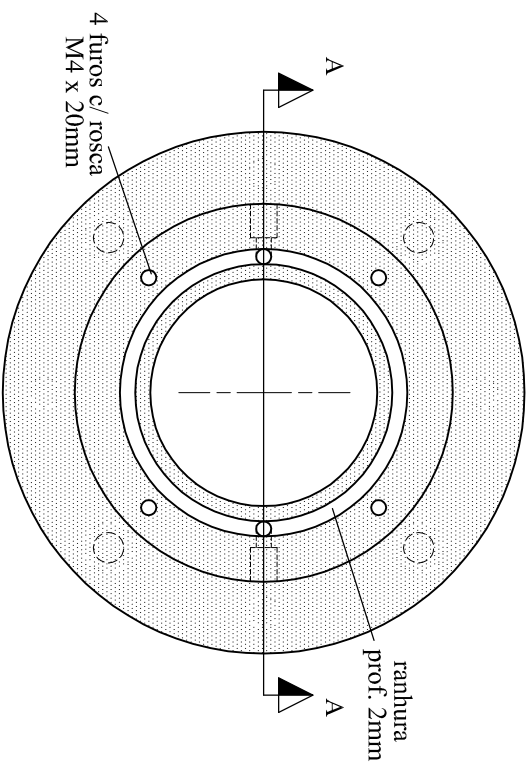


Cotas e medidas em mm

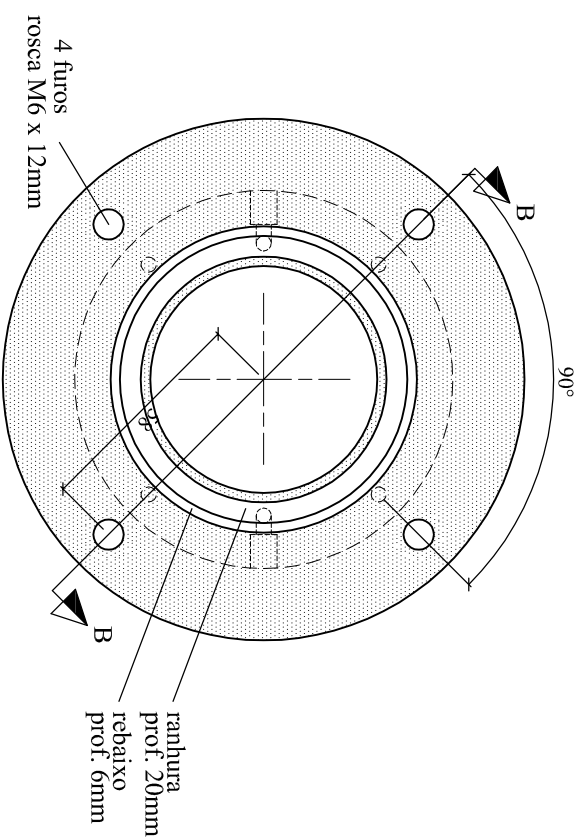
Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapa:	Estrutura metálica da câmara
Detalhamento:	base e topo do corpo de prova
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Data:	14/03/07
Escala:	1/2
Prancha:	EM-23

CABEÇOTE DO CORPO DE PROVA

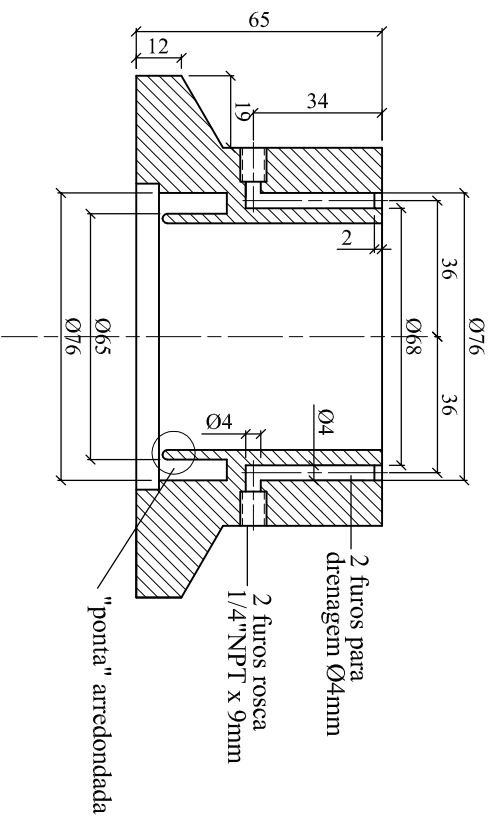
Vista superior



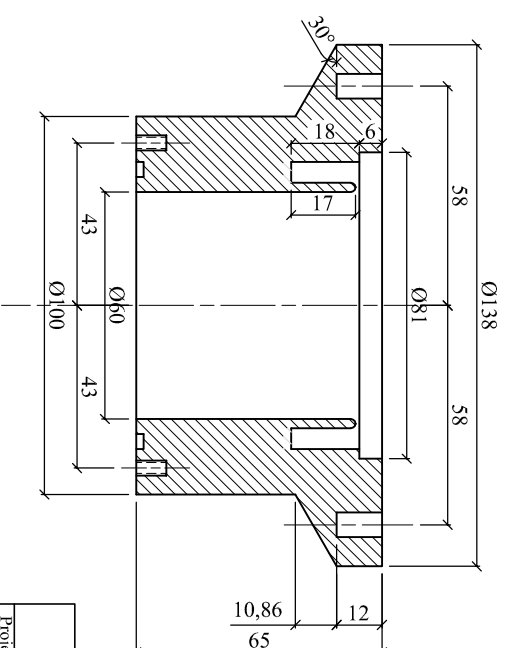
Vista inferior



Corte A-A



Corte B-B

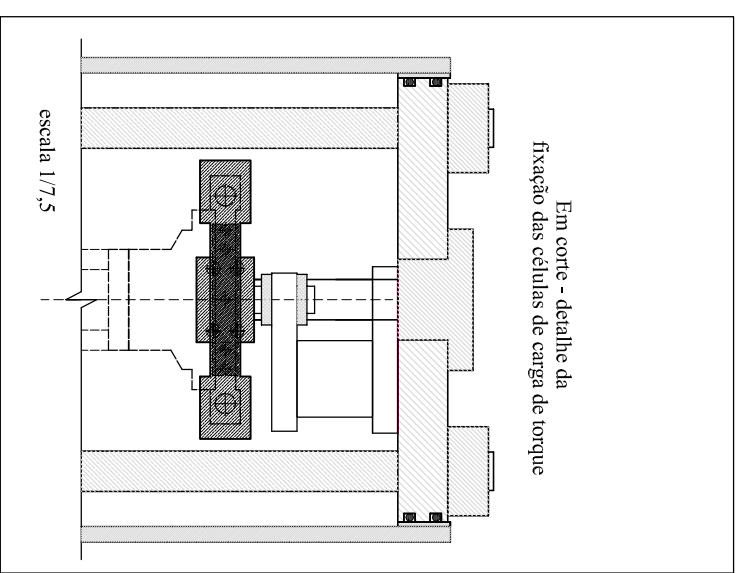
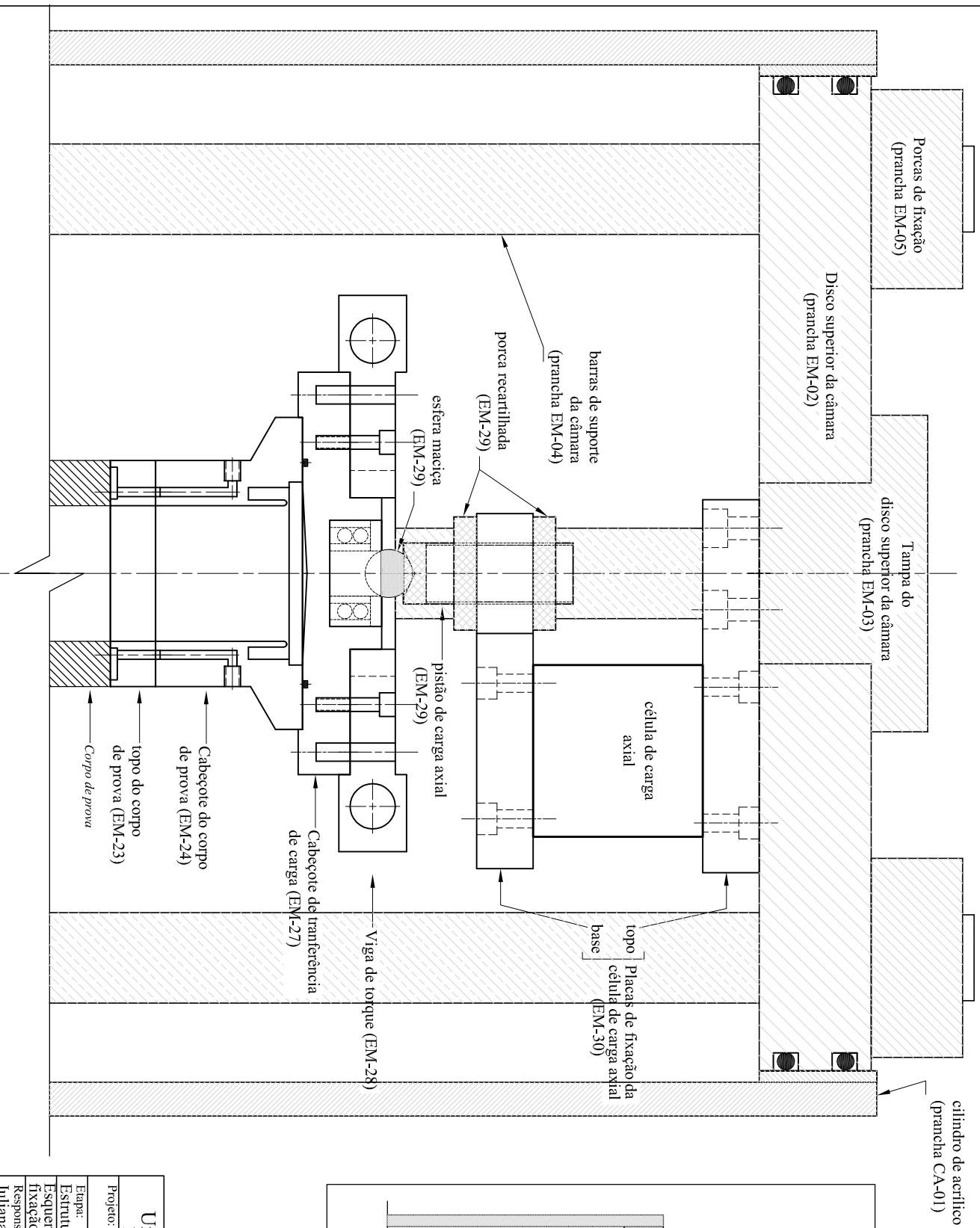


1 peça - ALUMÍNIO
Cotas e medidas em mm

Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Estrutura metálica da câmara
Detalhamento:	cabecote do corpo de prova
Responsáveis técnicos:	Pranchas:
Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica	EM-24
Data:	10/04/07
Escala:	1/2

ESQUEMA DE MONTAGEM E FIXAÇÃO DAS CÉLULAS DE CARGA

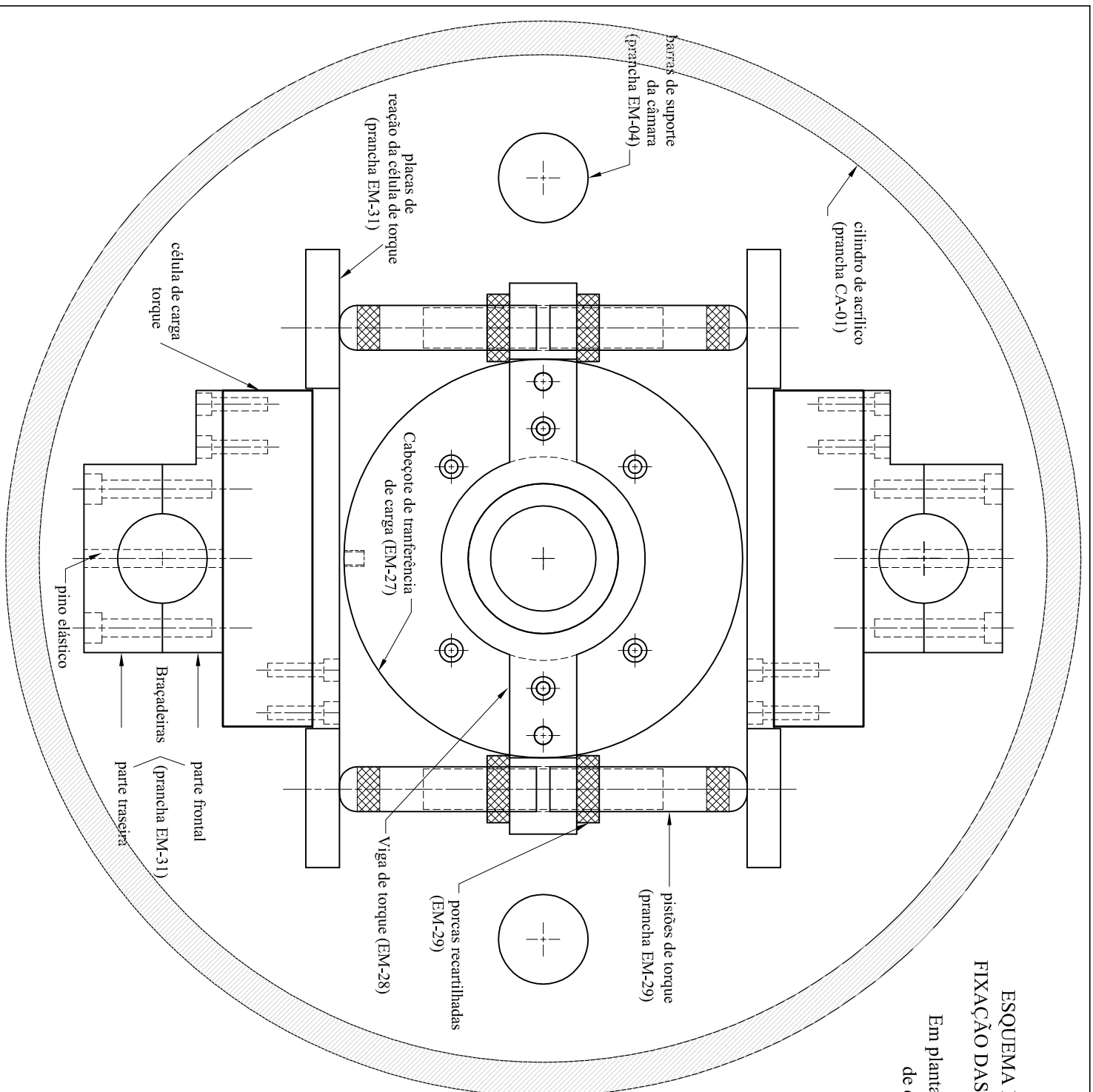
Corte frontal da câmara - detalhe da célula de carga axial



<p align="center">Universidade Federal do Rio Grande do Sul Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil</p>	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapa:	Estrutura metálica da câmara
Esquema de montagem e fixação das células de carga - corte	Escala: 1/2,5
Responsáveis técnicos:	Pranchas: EM-25
<p>Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica</p>	

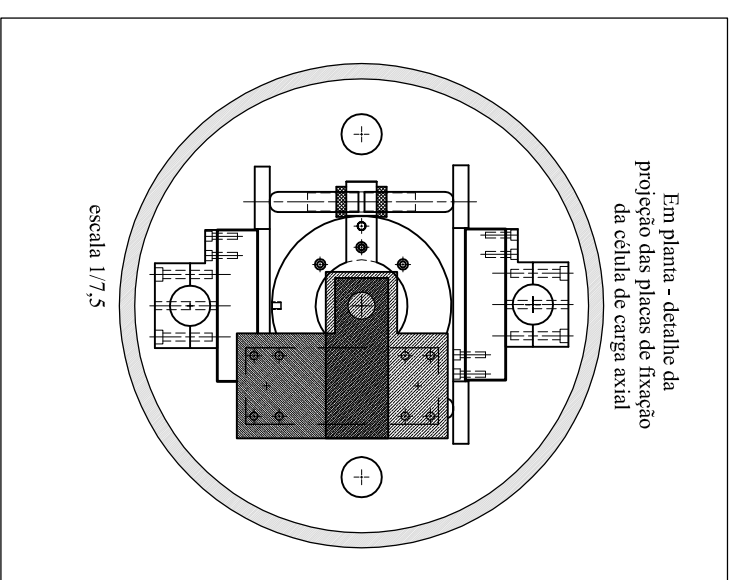
ESQUEMA DE MONTAGEM E FIXAÇÃO DAS CÉLULAS DE CARGA

Em planta - detalhe das células
de carga de torque



Em planta - detalhe da
projeção das placas de fixação
da célula de carga axial

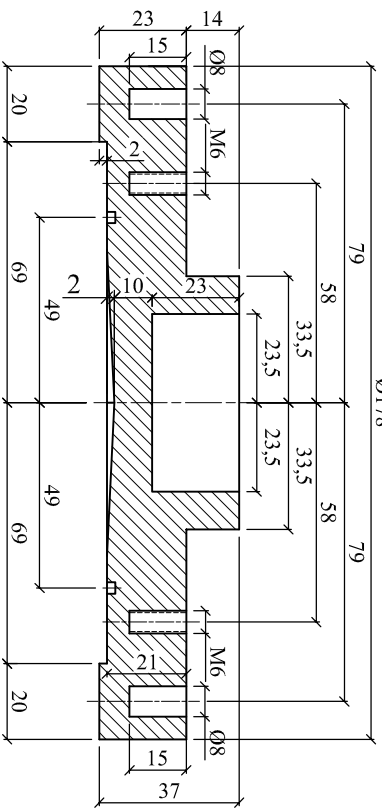
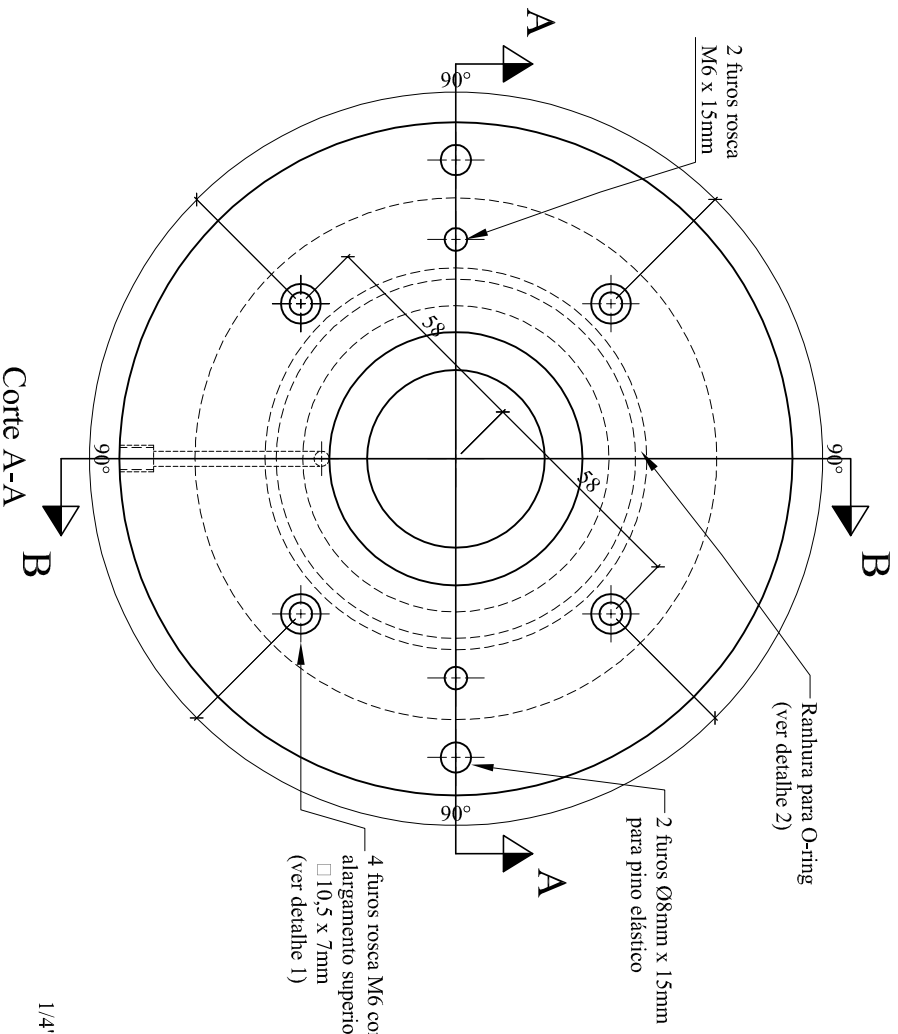
escala 1/7,5



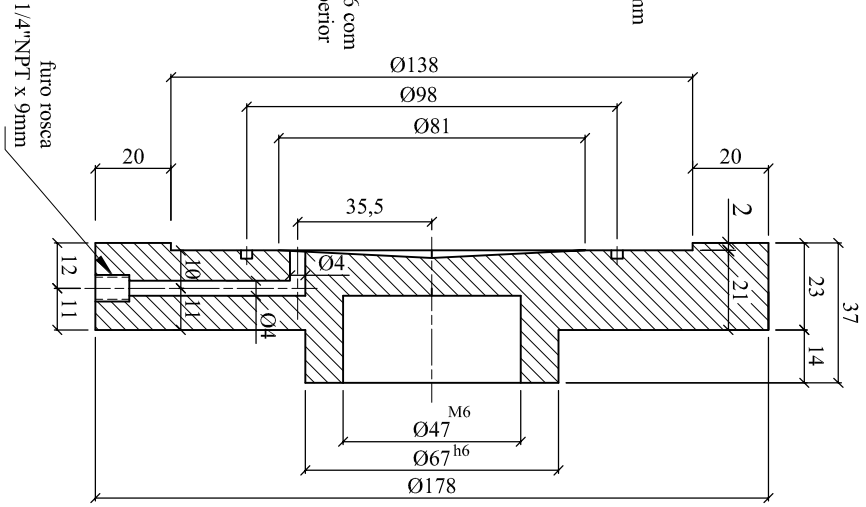
Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapa:	Estrutura metálica da câmara
Esquema de montagem e fixação das células de carga - planta	
Responsáveis técnicos:	Julliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Data:	09/05/07
Escala:	1/2,5
Pranchas:	EM-26

CABEÇOTE DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA

Vista superior



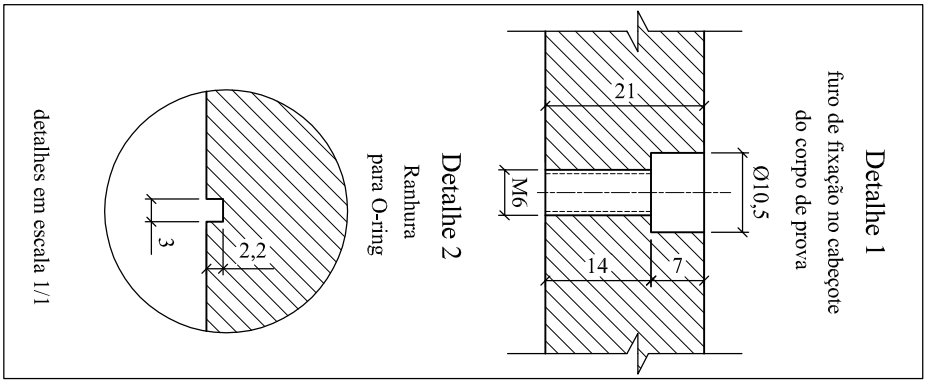
Corte B-B



- Ajuste de furo M6 - fixo normal:
47mm -0,004
-0,020

- Ajuste de eixo h6 - deslizante:
67mm -0,019
0,000

1 peça - alumínio

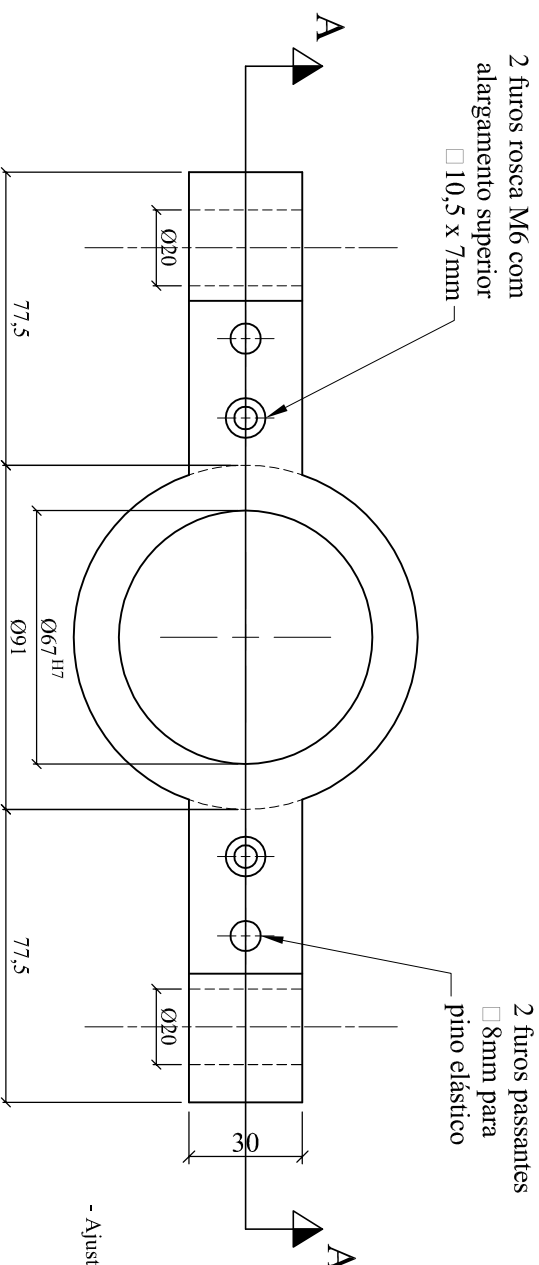


- Observações:
- 1 - Ver esquema de montagem na prancha EM-25 e 26
 - 2 - Os furos com rosca M6 e os de Ø8mm devem concordar com os furos da viga de torque (prancha EM-28)
 - 3 - Os 4 furos com rosca M6 mais ao centro da peça devem concordar com o cabeçote do corpo de prova (prancha EM-24)

Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Data:
Estrutura metálica da câmara	09/05/07
Detalhamento:	Escala:
Cabeçote de transferência de carga	1/2
Responsáveis técnicos:	Pranchas:
Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica	EM-27

VIGA DE TORQUE

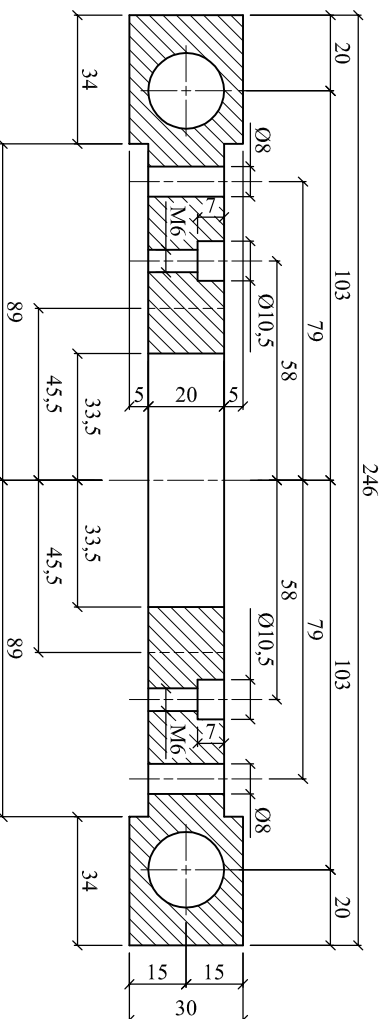
Vista superior



- Ajuste de furo H7 - deslizando:

0,000
67mm +0,030

Corte A-A



Observações:

- 1 - Ver esquema de montagem na prancha EM-25 e 26
- 2 - Os furos com rosca M6 e os de Ø8mm devem concordar com os furos do cabeçote de transferência de carga (prancha EM-27)

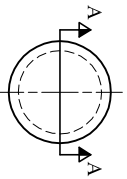
Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Data:
Estrutura metálica da câmara	09/05/07
Detalhamento:	Escala:
Viga de torque	1/2
Responsáveis técnicos:	Pranchas:
Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica	EM-28

PISTÕES DE CARGA

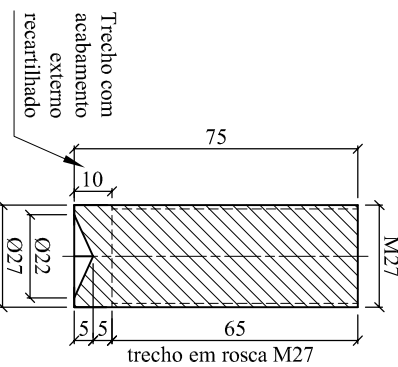
AXIAL

Pistão
(aço inox - 1 peça)

Vista superior

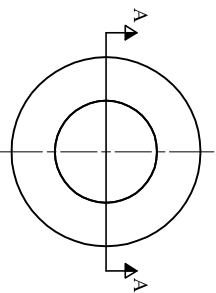


Corte A-A

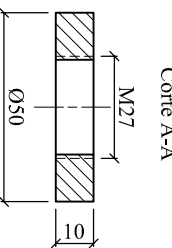


Porca recarilhada
(aço inox - 2 peças)

Vista superior

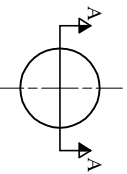


Corte A-A

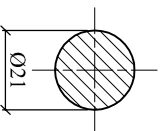


Esfera maciça
(alumínio - 1 peça)

Vista superior



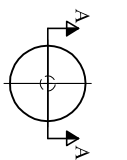
Corte A-A



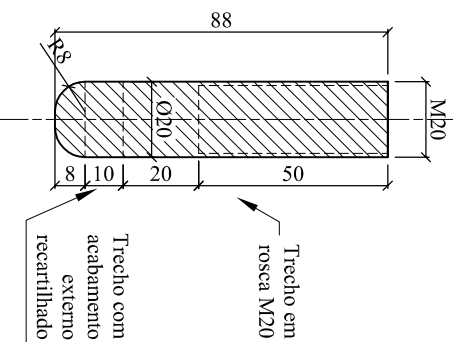
TORQUE

Pistão
(alumínio - 4 peças)

Vista superior

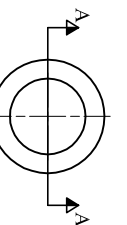


Corte A-A

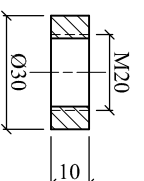


Porca recarilhada
(alumínio - 4 peças)

Vista superior



Corte A-A



Observações:

1 - Ver esquema de montagem geral na prancha EM-25 e EM-26
medidas em mm

Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapa:	Estrutura metálica da câmara
Detalhamento:	Pistões de carga - axial e torque
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Prancha:	EM-29
Data:	09/05/07
Escala:	1/2

PLACAS DE FIXAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA AXIAL

TOPO DA CÉLULA

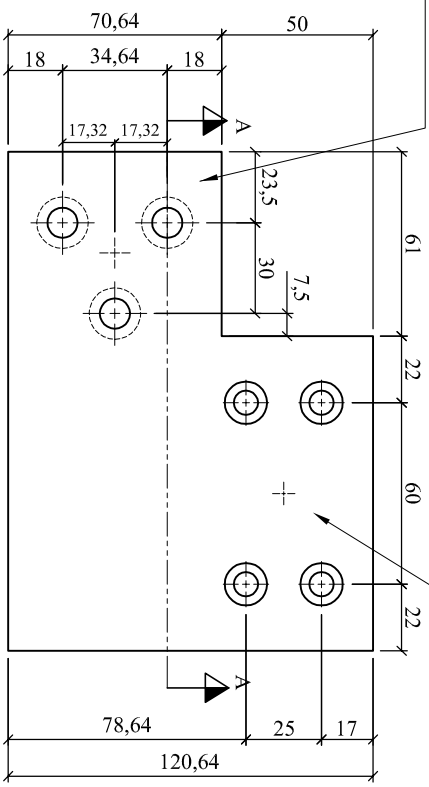
BASE DA CÉLULA

3 furos rosca M10 com alargamento na parte inferior de Ø17 x 11mm

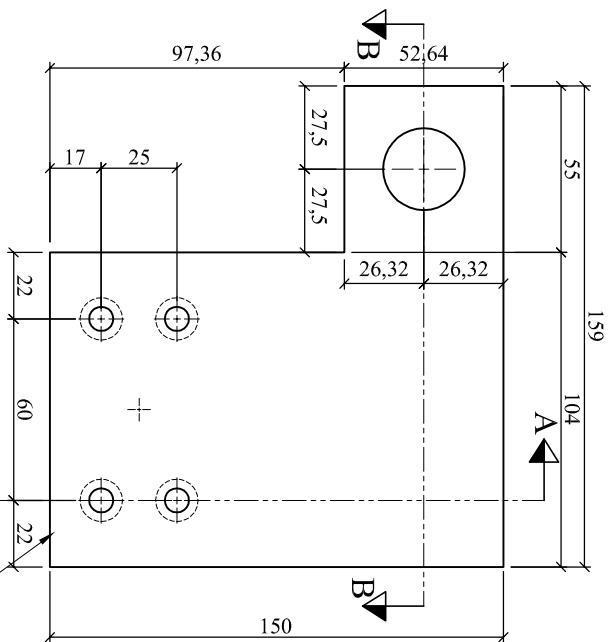
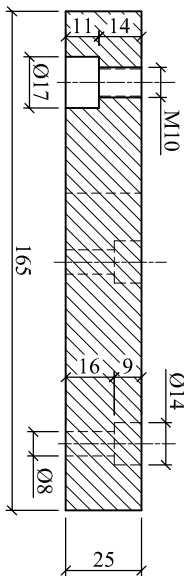
Vista superior

4 furos Ø8mm com alargamento na parte superior de Ø14 x 9mm

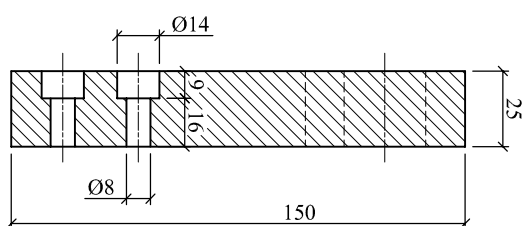
Vista superior



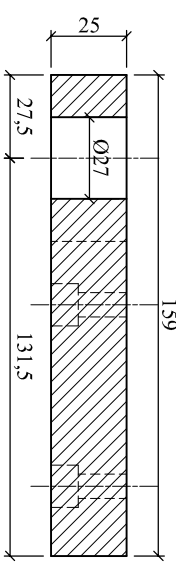
Corte A-A



Corte A-A



Corte B-B



Medidas em mm

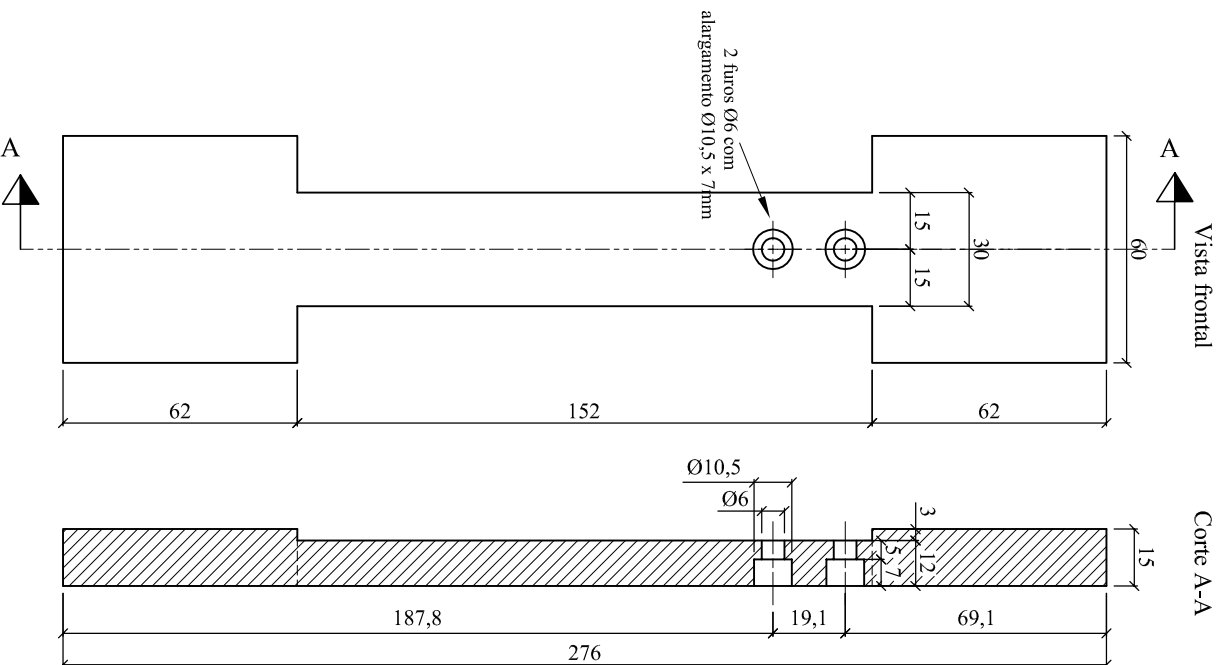
Observações:

- 1 - Ver esquema de montagem na prancha EM-25
- 2 - Furos com rosca M10 na placa de topo devem ser compatibilizados com furos da tampa do disco superior da câmara (prancha EM-03)

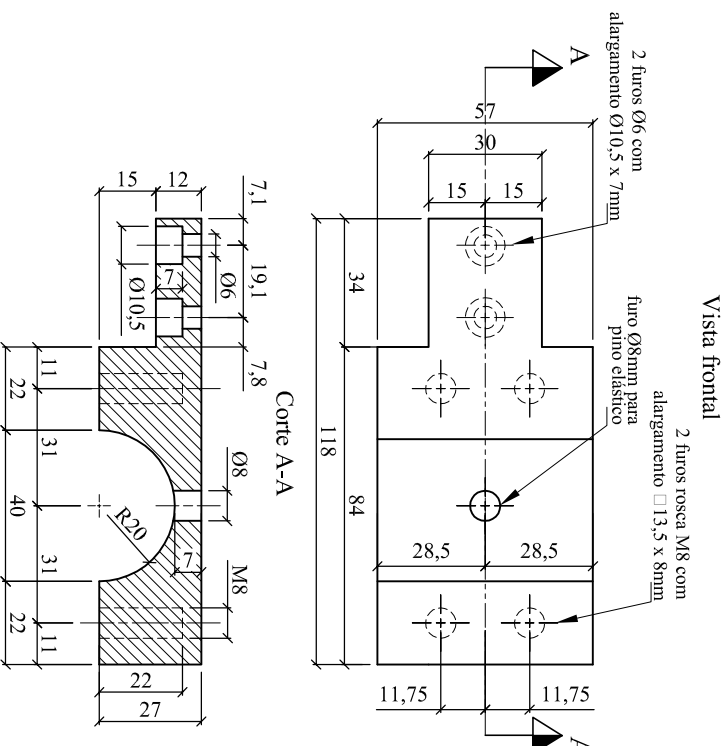
Universidade Federal do Rio Grande do Sul			
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil			
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional	Data:	09/05/07
Etapas:	Estrutura metálica da câmara	Escala:	1/2,5
Detalhamento:	Peças de fixação da célula de carga axial	Prancha:	EM-30
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica		

PEÇAS PARA FIXAÇÃO DAS CÉLULAS DE CARGA DE TORQUE

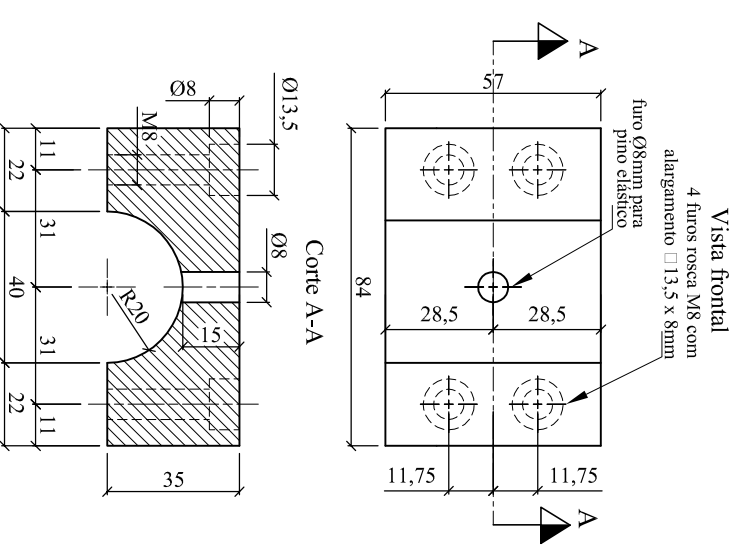
PLACA DE REAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA DE TORQUE



BRAÇADEIRA - PARTE FRONTAL



BRAÇADEIRA - PARTE TRASEIRA



2 peças de cada - aço inox

Medidas em mm

Observações:

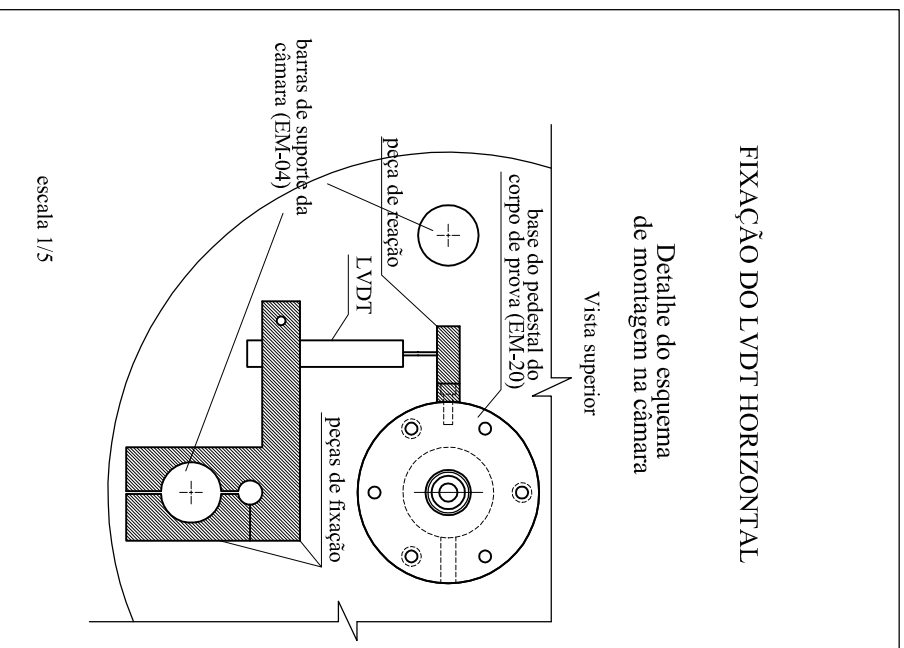
1 - Ver esquema de montagem na prancha EM-26

Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapa:	Detalhamento: Peças de fixação da célula de carga de torque
Responsáveis técnicos:	Julliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Data:	09/05/07
Escala:	1/2
Prancha:	EM-31

FIXAÇÃO DO LVDT HORIZONTAL

Detalhe do esquema de montagem na câmara

Vista superior

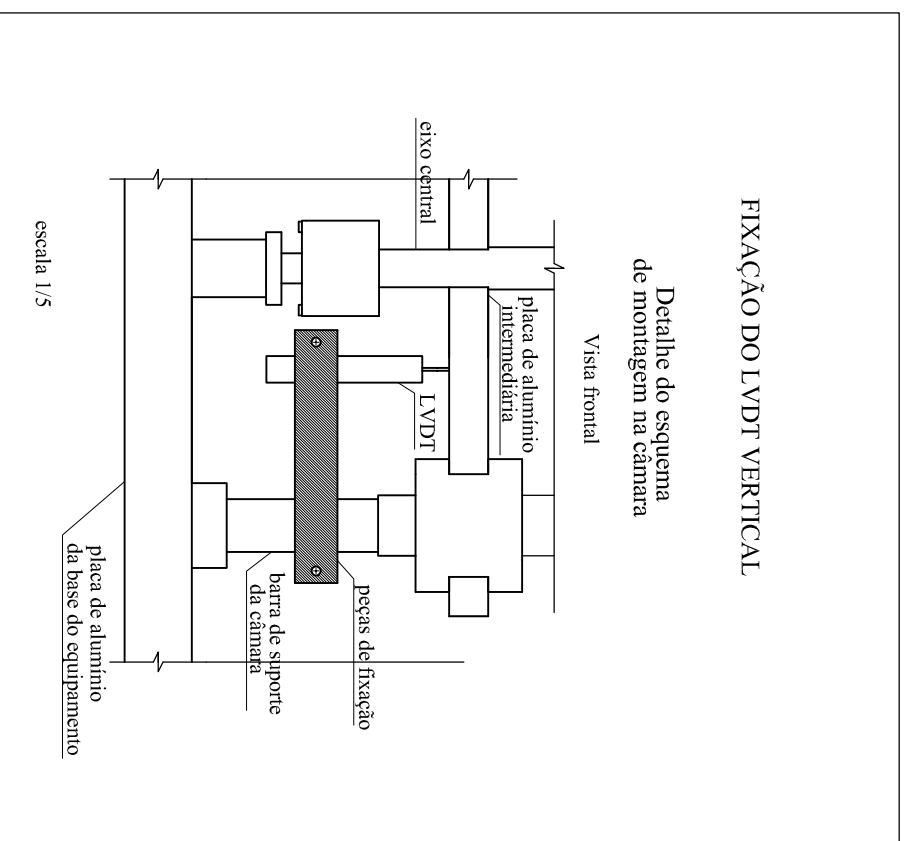


Pecas detalhadas na prancha EM-33

FIXAÇÃO DO LVDT VERTICAL

Detalhe do esquema de montagem na câmara

Vista frontal



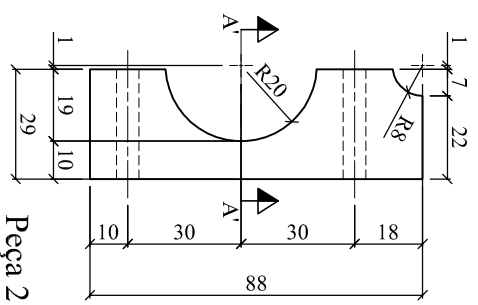
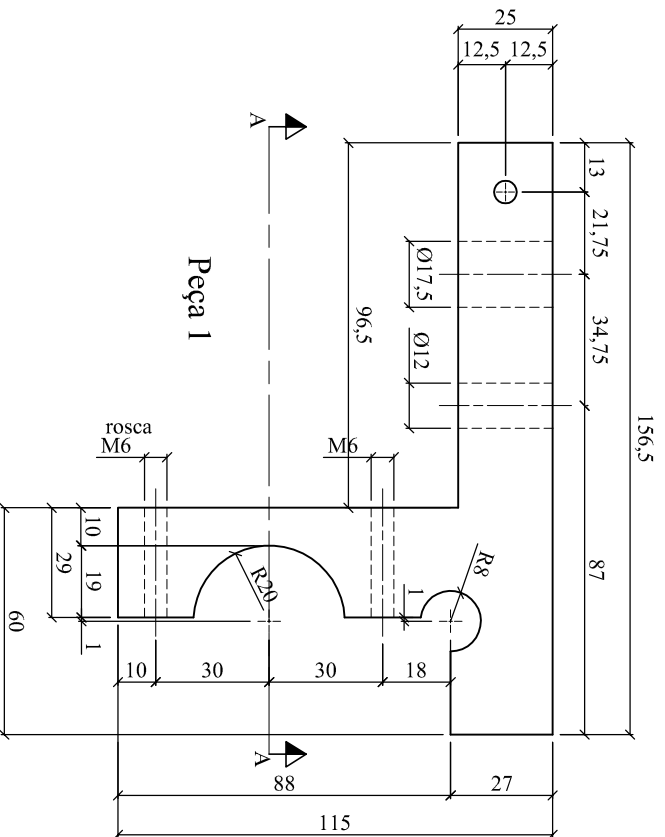
Pecas detalhadas na prancha EM-34

Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Estrutura metálica da câmara
Esquema de fixação dos LVDTs na prensa	Escala: indicada
Responsáveis técnicos:	Prancha: EM-32
Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica	

PEÇAS DE FIXAÇÃO DO LVDT HORIZONTAL
aluminio - 2 peças

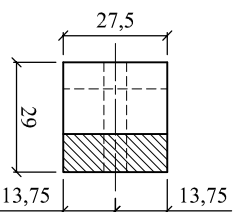
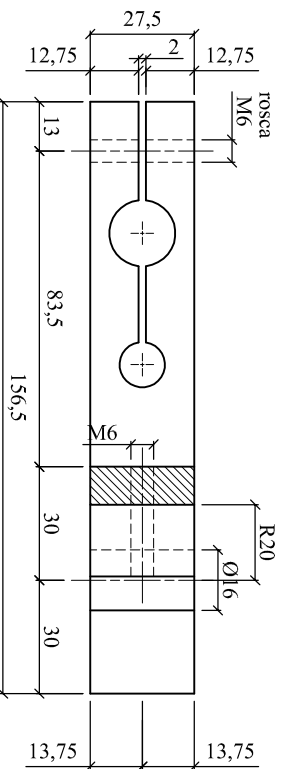
PEÇA DE REAÇÃO DO LVDT HORIZONTAL
aço inox - 1 peça

Vista superior

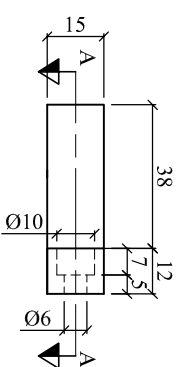


Corte A-A

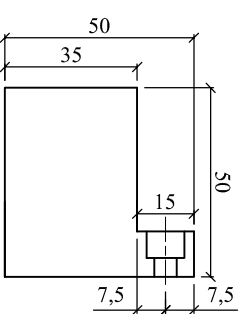
Corte A'-A'



Vista superior



Corte A-A



Obs:

- 1 - Esquema de montagem na prancha EM-32
- 2 - Cotas e medidas em mm

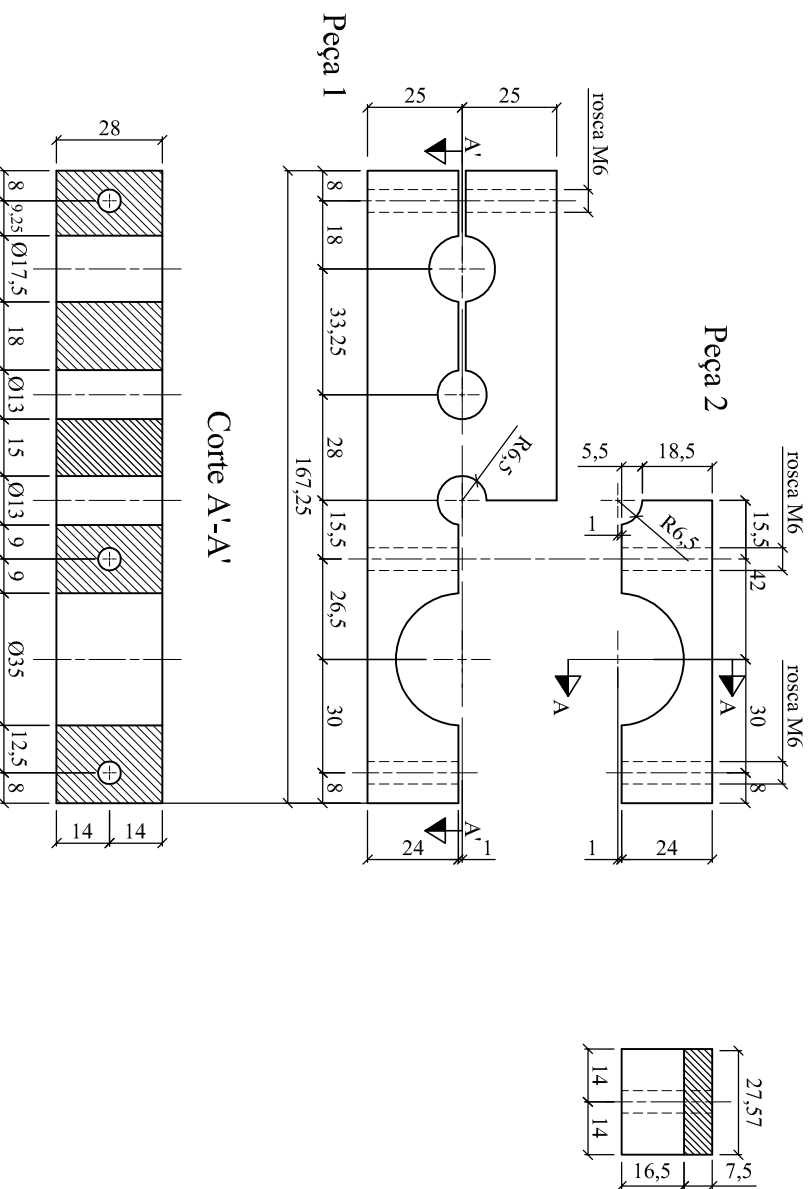
Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Estrutura metálica da câmara
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Escala:	1/2
Prancha:	EM-33
Data:	09/05/07

PEÇAS DE FIXAÇÃO DO LVDT VERTICAL

alumínio - 2 peças

Vista superior

Corte A-A



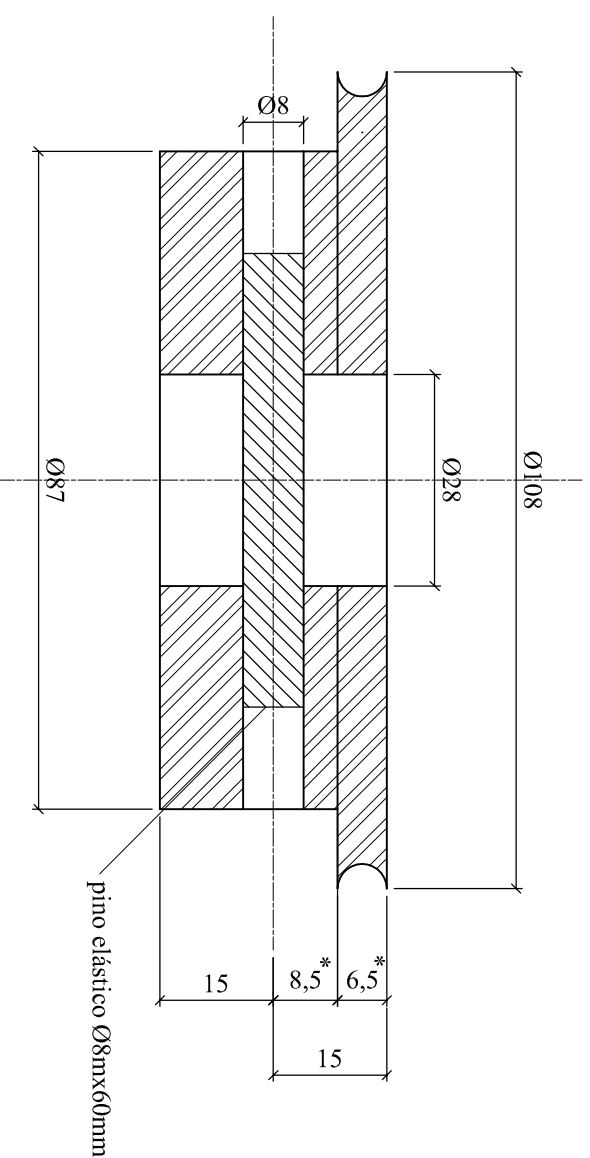
Obs:

- 1 - Esquema de montagem na prancha EM-32
- 2 - Cotas e medidas em mm

Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapa:	Estrutura metálica da câmara
fixação do LVDT vertical	Escala: 1/2
Responsáveis técnicos:	Prancha: EM-34
Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica	

USINAGEM DA RODA DENTADA

dimensões finais

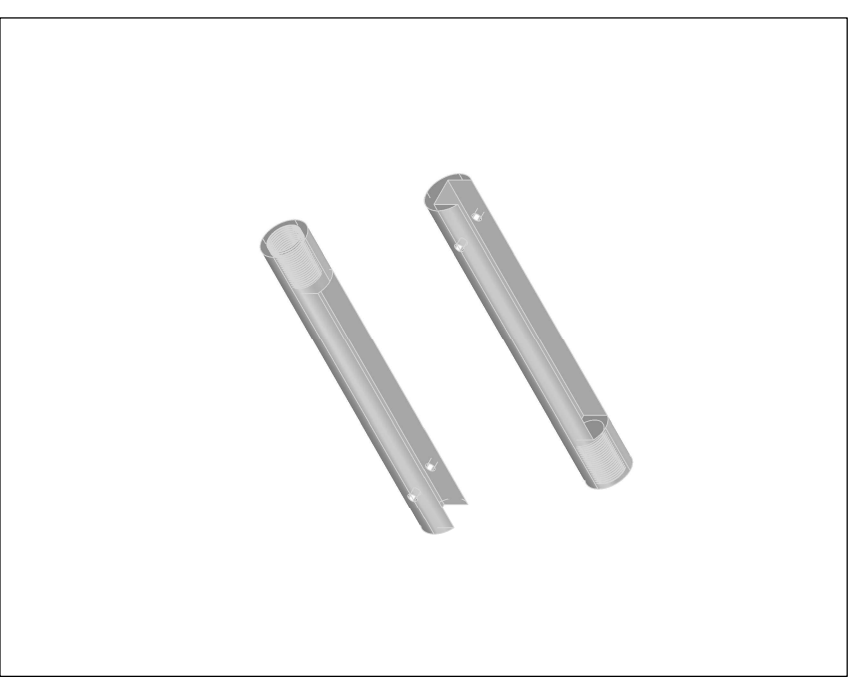


* Conferir estas medidas, eixo do pino elástico deve estar necessariamente 15mm abaixo do topo da peça

Cotas e medidas em mm

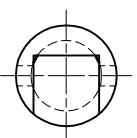
Universidade Federal do Rio Grande do Sul Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Data:
Estrutura metálica da câmara	20/07/06
Detalhamento:	Escala:
roda dentada	1/1
Responsáveis técnicos:	Pranchas:
Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica	EM-35

Perspectiva isométrica

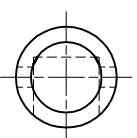


PEÇA DE LIGAÇÃO DA CORREIA COM
O EIXO DO BELLOFRAM

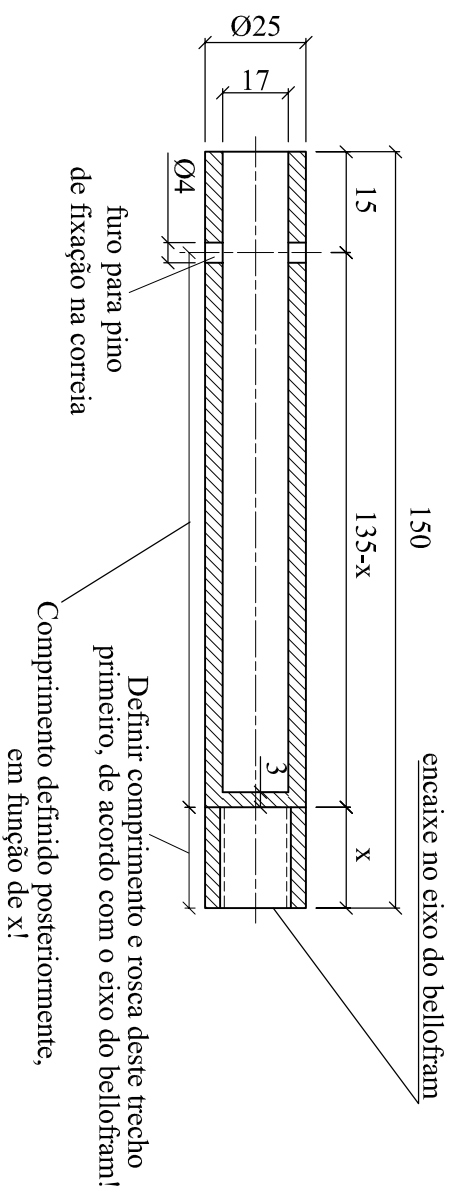
Vista do topo



Vista da base



Corte longitudinal

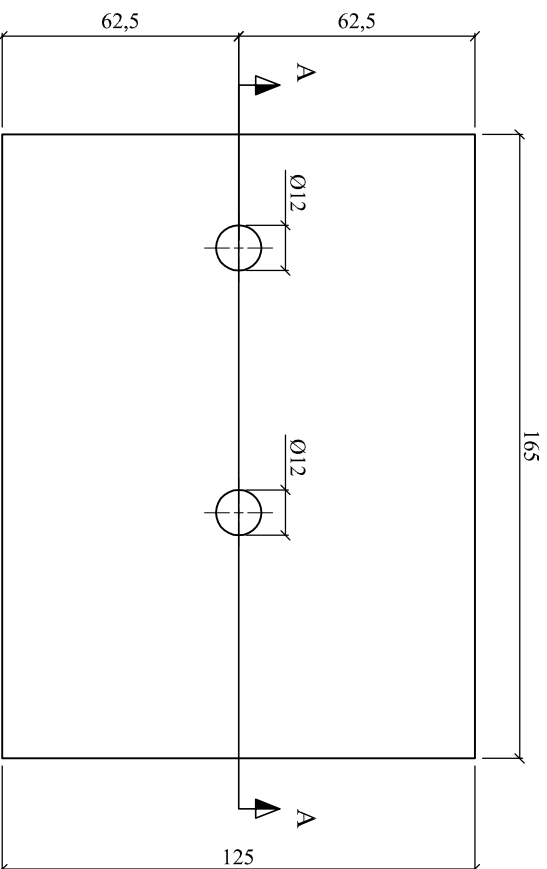


Cotas e medidas em mm

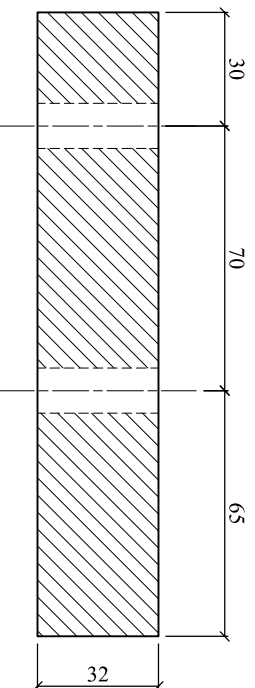
Projeto:		Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil		Equipamento Hollow Cylinder Torsional	
Etapas:	Data:	17/01/06	
Estrutura metálica da câmara	Escala:		
Detalhamento:	1/1,5		
Ligação correia-bellofram	Prancha:		
Responsáveis técnicos:	EM_36		
Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica			

PLACAS DE APOIO DO DISCO SUPERIOR

Vista superior



Corte A-A



4 peças - aço comum

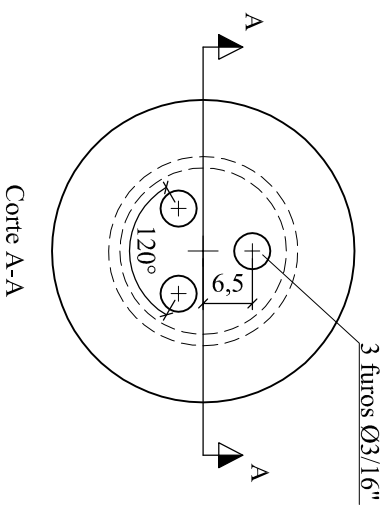
Cotas e medidas em mm

Projeto: Equipamento Hollow Cylinder Torsional	
Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Etapas:	Data:
Estrutura metálica da câmara	17/07/06
Detalhamento:	Escala:
placas de apoio do disco superior	1/2
Responsáveis técnicos:	Prancha:
Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica	EM_37

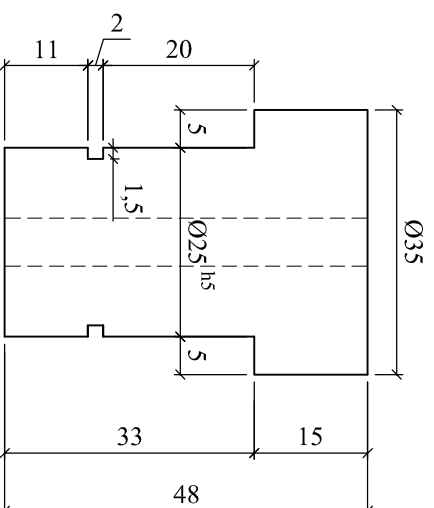
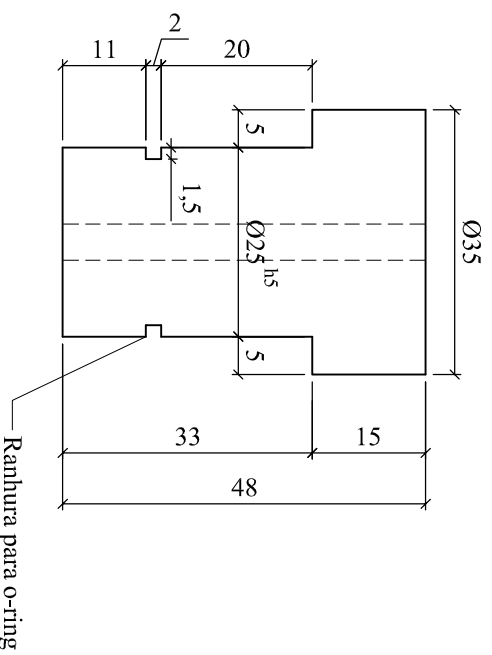
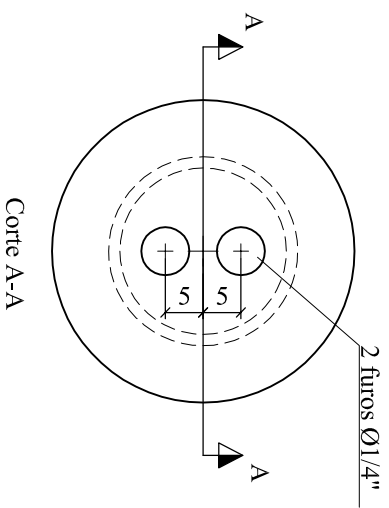
BUCHAS DO DISCO
INFERIOR DA CÂMARA

3 peças de cada - ALUMÍNIO

Vista superior



Vista superior



h_5 - ajuste deslizante
0,000
-0,009

Ranhura para o-ring

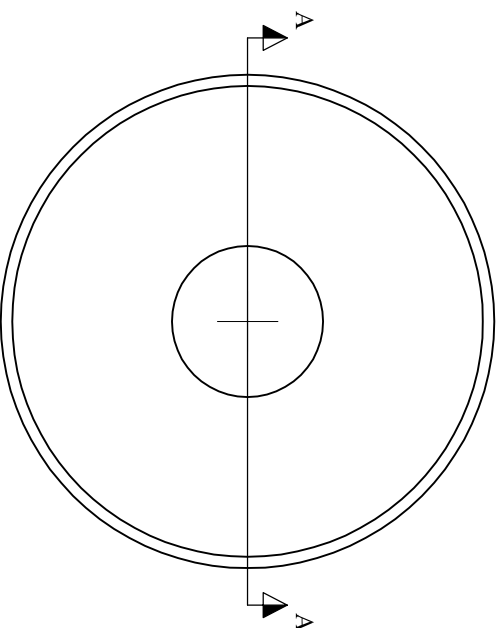
cotas e medidas em mm

Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapa:	Data:
Estrutura metálica da câmara	11/10/07
Detalhamento:	Escala:
buchas do disco inferior	1/1
Responsáveis técnicos:	Prancha:
Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica	EM-38

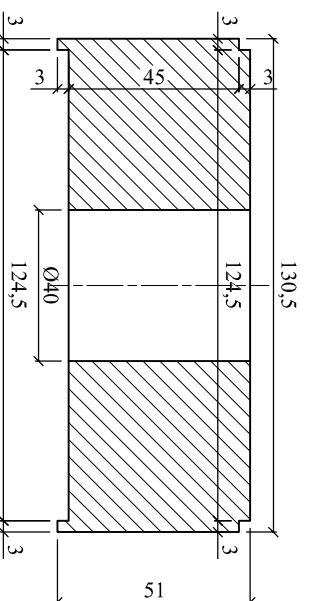
Bucha de ajuste de altura do cilindro bellofram inferior

1 PEÇA - ALUMÍNIO

Vista superior



Corte A-A



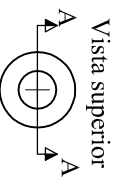
Cotas e medidas em mm

Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Data:
Estrutura metálica da câmara	11/10/07
Detalhamento:	Escala:
buca do bellofram grande	1/2
Responsáveis técnicos:	Prancha:
Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica	EM-39

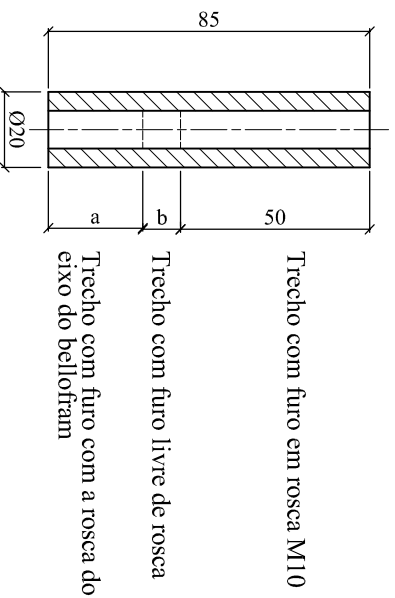
1 PEÇA DE CADA- AÇO INOX

PROLONGAMENTO DO EIXO DO BELLOFRAM DE SUPORTE DA PLACA INTERMEDIÁRIA

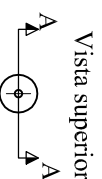
LUVA DE AJUSTE



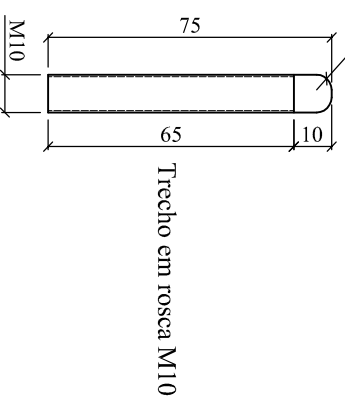
Corte A-A



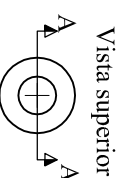
PISTÃO



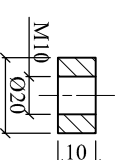
Corte A-A



CONTRA-PORCA RECARTEILHADA



Corte A-A



Cotas e medidas em mm

Universidade Federal do Rio Grande do Sul Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etap:	Data: 11/10/07
Detalhamento:	Escala: 1/2
prolongamento eixo bellofram	
Responsáveis técnicos:	Prancha: EM-40
Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica	

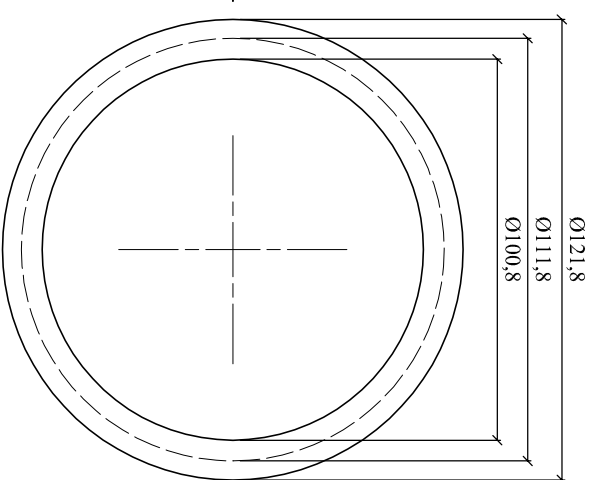
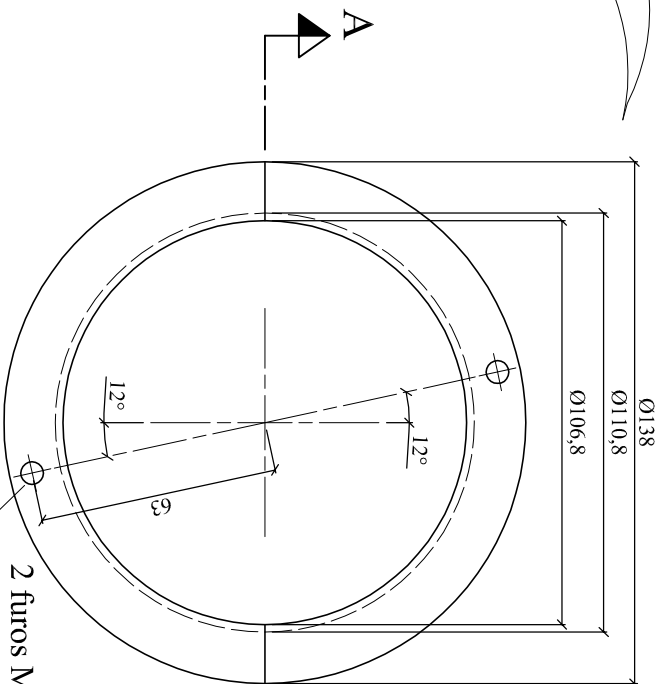
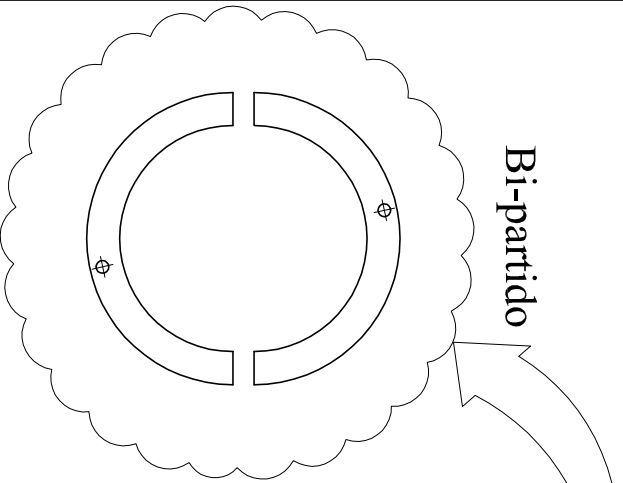
1 peça de cada
aço comum

PEÇAS DO MOLDE DO CP

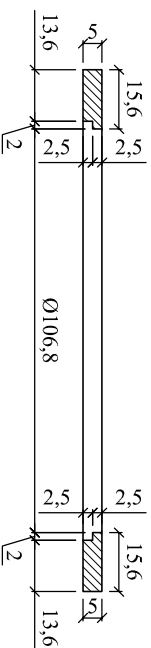
Anel de base
vista superior

Cilindro complementar
vista superior

Bi-partido

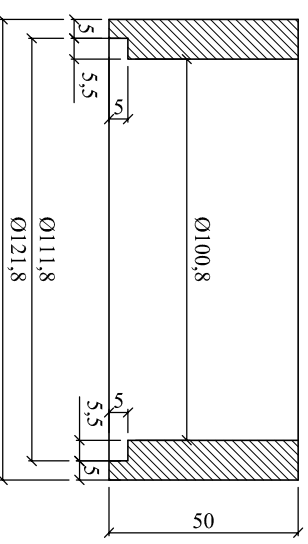


Corte A-A



2 furos M6 (devem concordar com o pedestal do CP - prancha EM 22)

Corte A-A



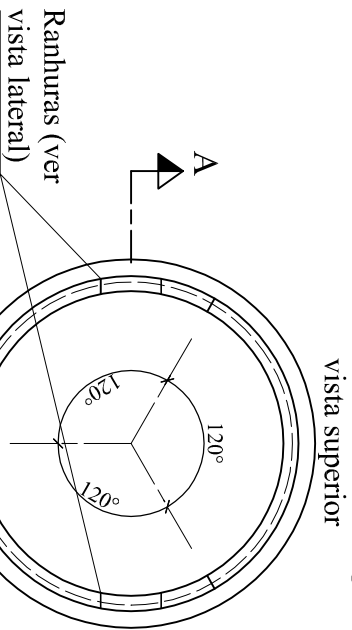
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	peças complementares
Data:	20/04/08
Molde CP - anel de base e topo	Escala:
Responsáveis técnicos:	Prancha:
Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica	PC-01

cotas e medidas em mm

Cilindro do molde

cotas e medidas em mm



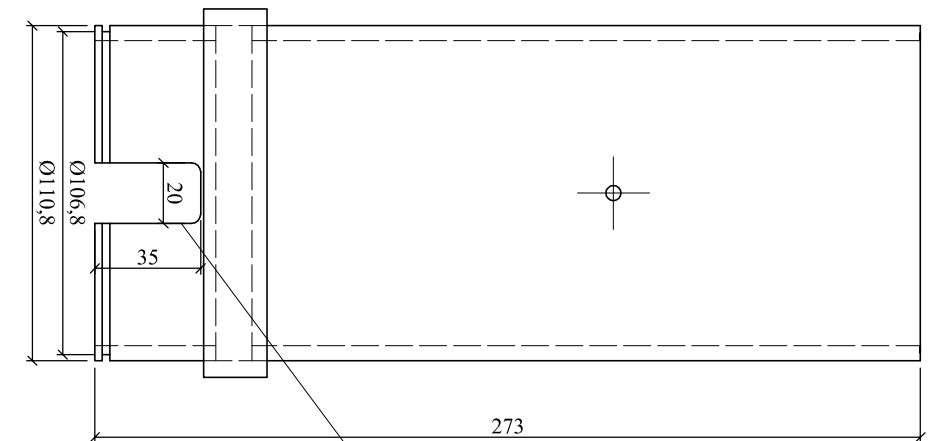
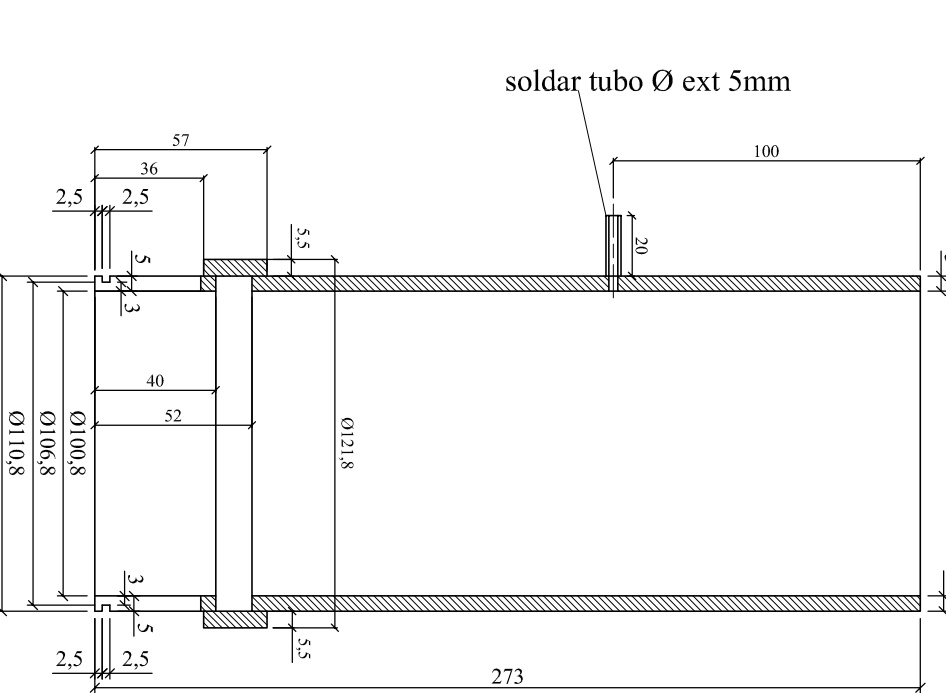
vista superior

Tri-partido

1 peça - aço comum

Corte A-A

Vista lateral



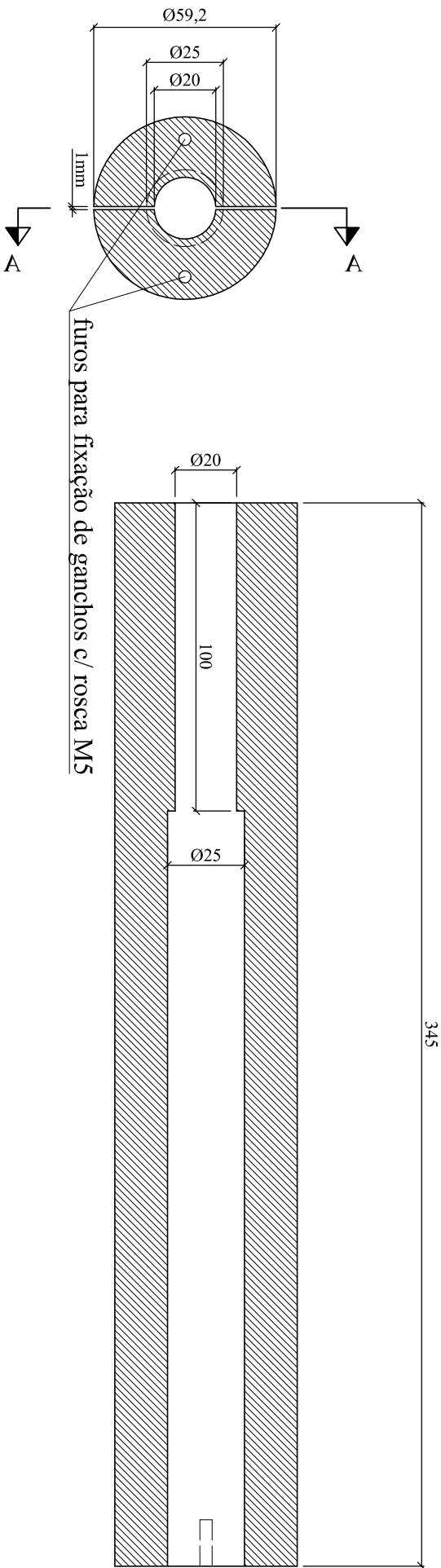
2 ranhuras (simetricamente opostas) para encaixar nas conexões da base (prancha EM-22)

Universidade Federal do Rio Grande do Sul			
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil			
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional	Data:	20/04/08
Etapa:	peças complementares	Escala:	1/2,5
Molde CP - cilindro do molde		Prancha:	PC-02
Responsáveis técnicos: Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica			

MOLDE INTERNO EM ACRÍLICO (em acrílico, vazado e bi-partido)

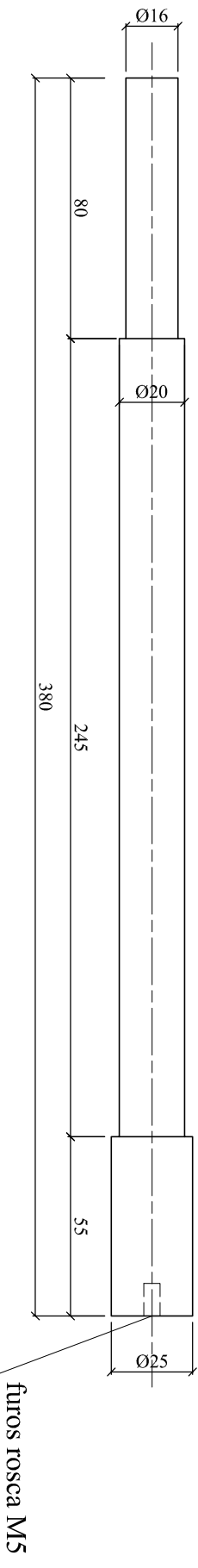
Vista superior

Corte A-A



furos para fixação de ganchos c/ rosca M5

HASTE CENTRAL (aço comum)

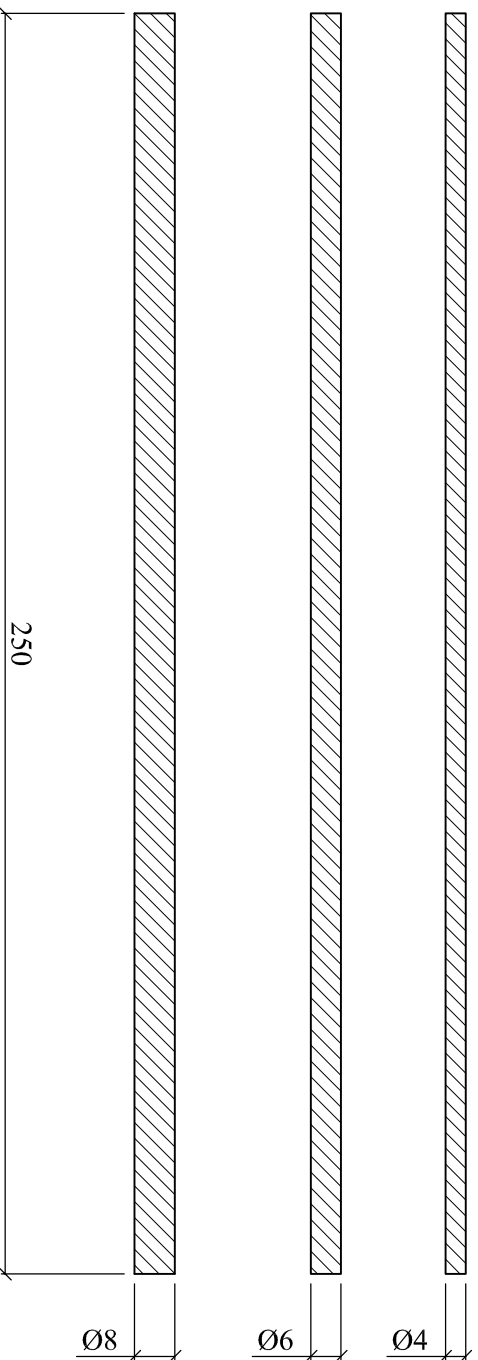


furos rosca M5

cotas e medidas em mm

Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Data:
Peças complementares	
Molde CP - molde interno em acrílico	
Responsáveis técnicos:	Escala:
Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica	Prancha:
	PC-03

VARETAS PARA COMPACTAÇÃO DO CP



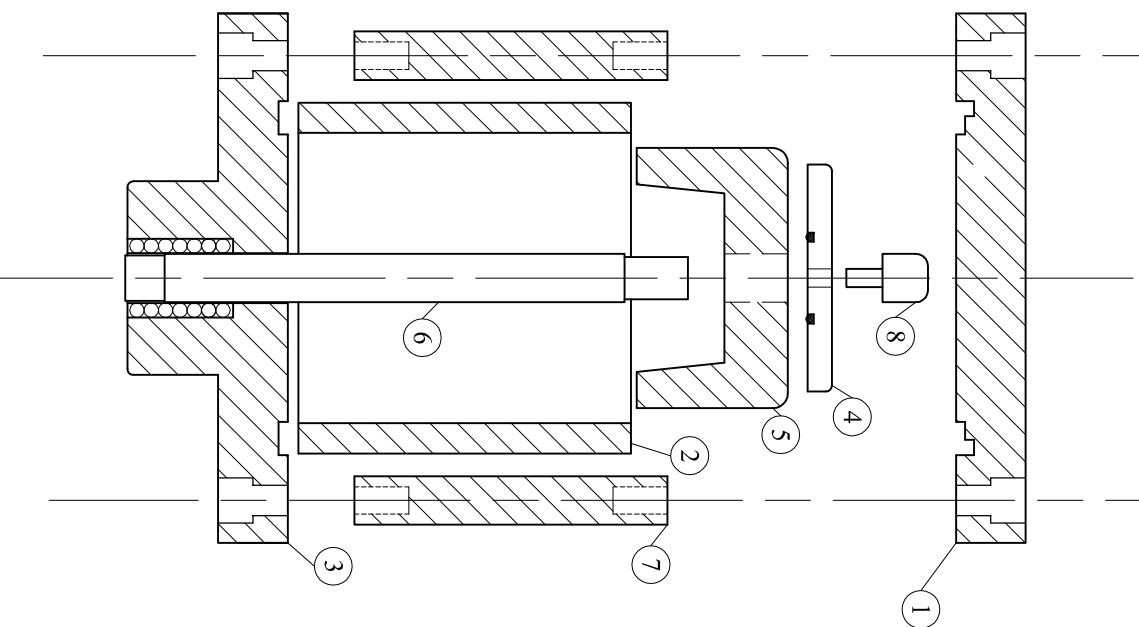
1 peça de cada
aço inox

cotas e medidas em mm

Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Data:
Peças complementares	20/04/08
Molde CP - varetas para moldagem	Escala: 1/1,5
Responsáveis técnicos:	Prancha:
Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica	PC-04

CILINDRO BELLOFRAM PEQUENO

Corte esquemático para montagem



CILINDRO BELLOFRAM	
Relação de peças para montagem	Quantidade
① disco superior	1
② cilindro central	1
③ placa inferior	1
④ disco central	1
⑤ peça central	1
⑥ eixo central	1
⑦ barras laterais	3
⑧ pino central	1

Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Cilindros Bellofram
Detalhamento:	Cilindro Bellofram pequeno
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Data:	29/08/05
Escala:	1/2.5
Pranchas:	CB-01

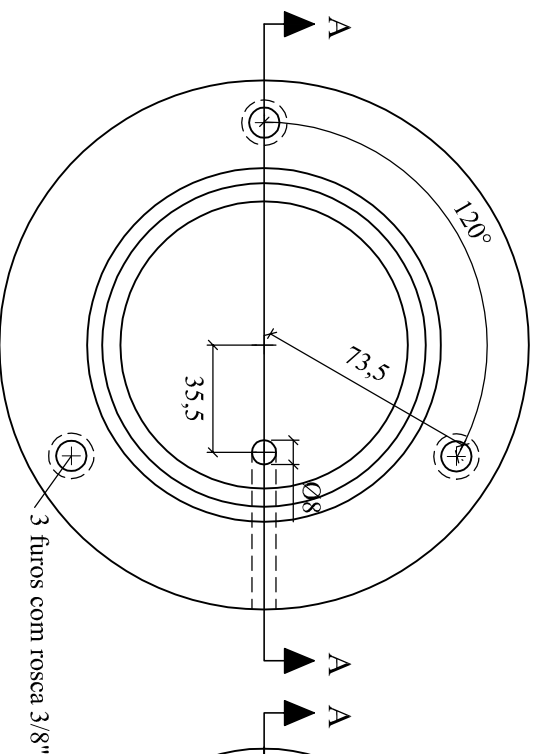
Ver detalhamento das peças nas pranchas CB-02 e CB-03

CILINDRO BELLOFRAM PEQUENO

peças para montagem

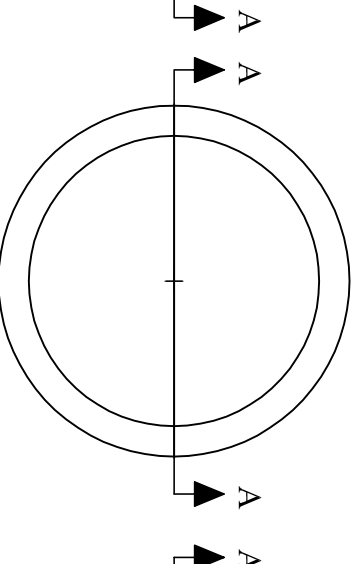
Disco superior

Vista superior
(1 peça - alumínio)



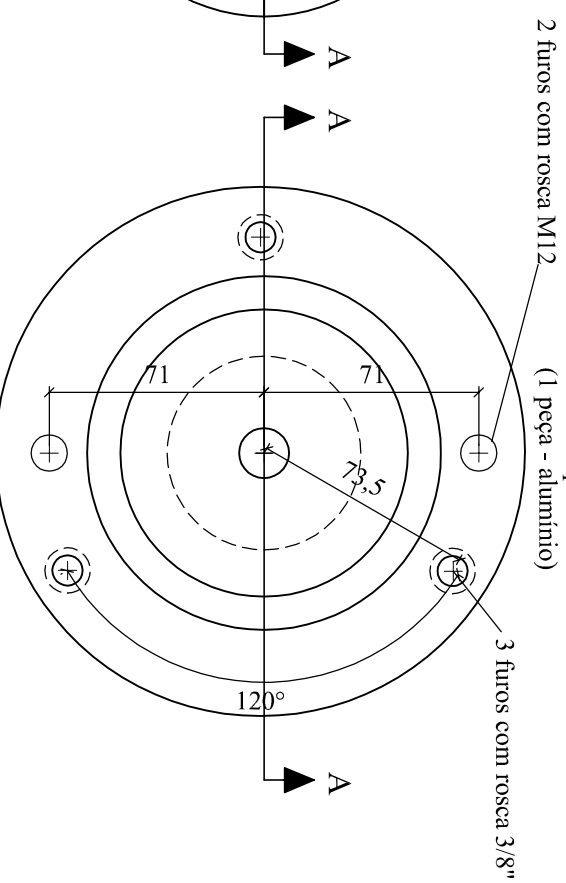
Cilindro central

Vista superior



Placa inferior

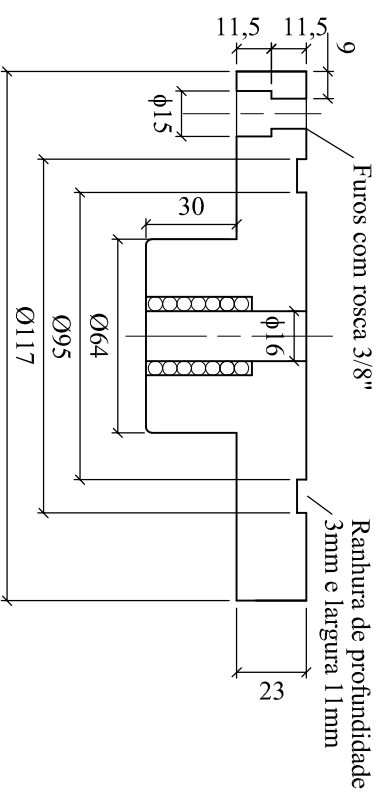
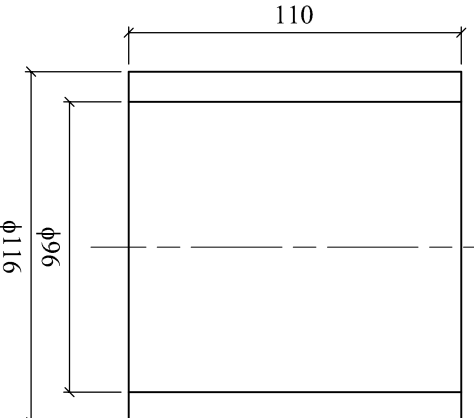
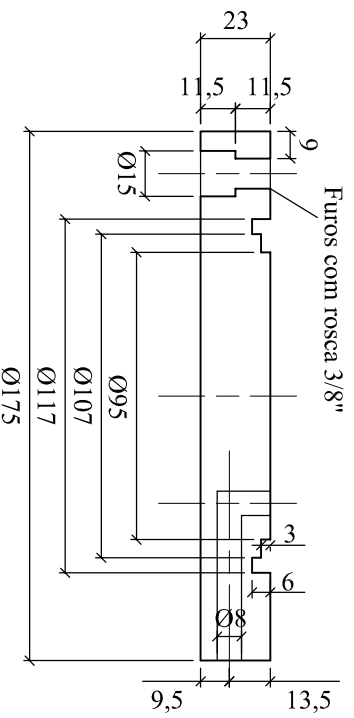
Vista superior
(1 peça - alumínio)



Corte A-A

Corte A-A

Corte A-A



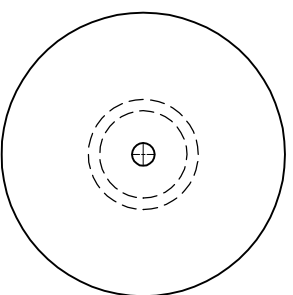
Ver detalhes de montagem na prancha CB-01

Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Cilindros Bellofram
Detalhamento:	Cilindro Bellofram pequeno
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Data:	10/03/06
Escala:	1/2,5
Pranchas:	CB-02

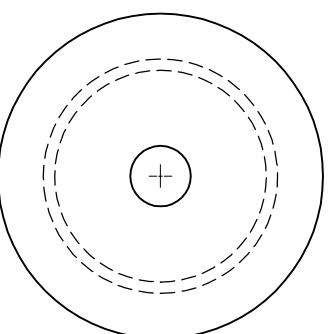
CILINDRO BELLOFRAM PEQUENO

Peças para montagem

Disco central
Vista superior
(1 peça - alumínio)



Peça central
Vista superior
(1 peça - alumínio)



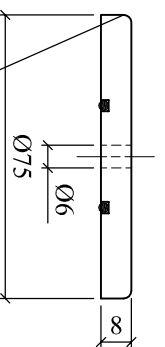
Eixo central
Vista superior
(1 peça - aço inox)



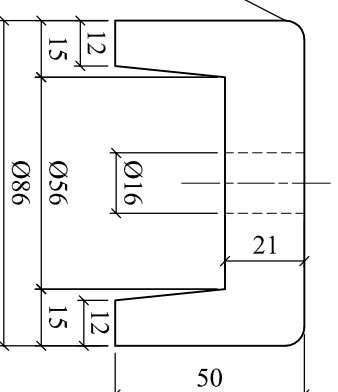
Barras laterais
Vista superior
(3 peças - aço inox)



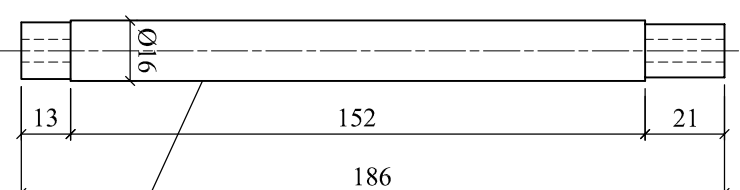
Corte A-A



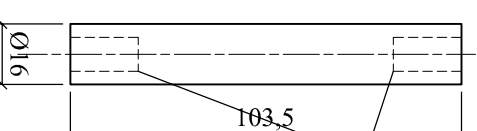
Corte A-A



Corte A-A



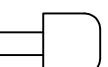
Corte A-A



Raio de concordância 3mm

Superfície polida para
rolamento linear Ø16mm

Pino central

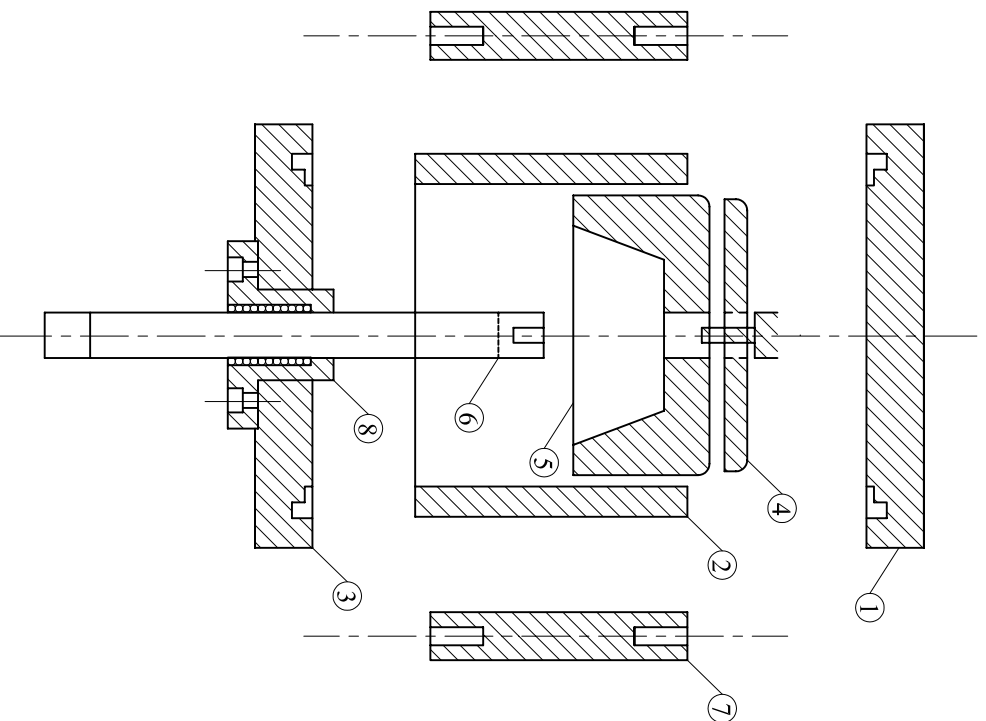


Ver detalhes de montagem na prancha CB-01

Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Cilindros Bellofram
Detalhamento:	Cilindro Bellofram pequeno
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Data:	10/03/06
Escala:	1/2
Prancha:	CB-03

CILINDRO BELLOFRAM GRANDE

Corte esquemático
para montagem



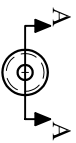
Relação de peças para montagem	Quantidade
① Placa superior	1
② cilindro central	1
③ Placa inferior	1
④ disco central	1
⑤ peça central	1
⑥ eixo central	1
⑦ barras laterais	4
⑧ bucha para rolamento linear	1

<p>Universidade Federal do Rio Grande do Sul Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil</p>	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Cilindros Bellofram
Detalhamento:	Cilindro Bellofram grande
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Data:	20/01/06
Escala:	indicada
Prancha:	CB-04

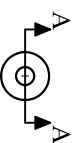
CILINDRO BELLOFRAM GRANDE

peças para montagem

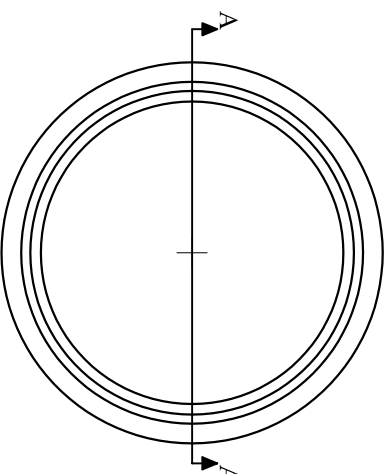
Eixo central
Visita superior



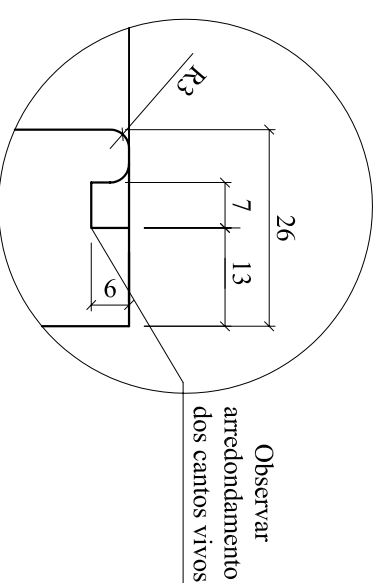
Barras laterais
Visita superior



Cilindro central
Visita superior

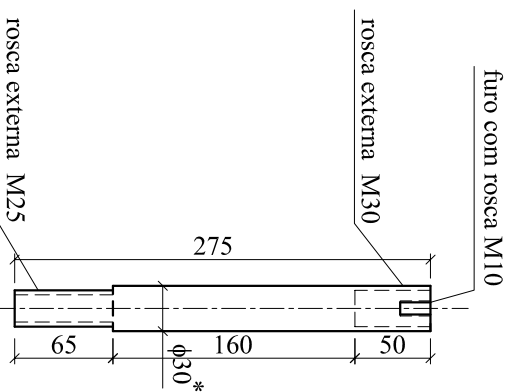


Detalhe 1

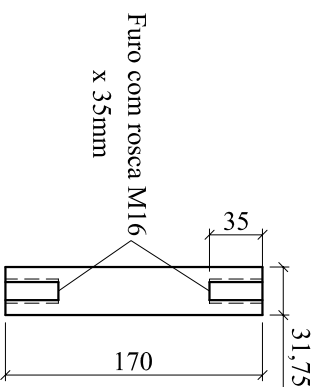


escala 1/1

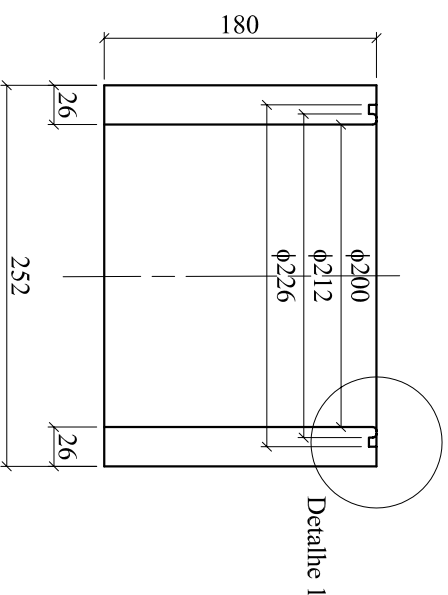
Corte A-A



Corte A-A



Corte A-A



* O eixo passa por um rolamento linear de $\phi 30\text{mm}$ (ajuste deslizante)

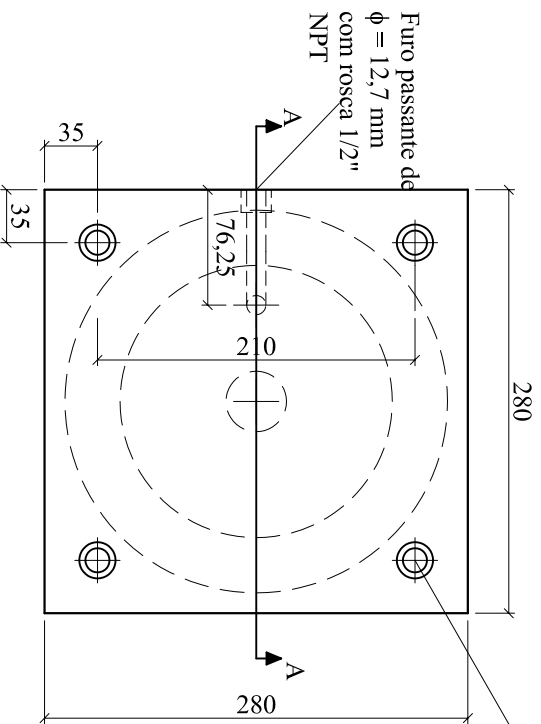
Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Cilindros Bellofram
Detalhamento:	Cilindro Bellofram grande
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Data:	20/01/06
Escala:	1/5
Prancha:	CB-05

CILINDRO BELLOFRAM GRANDE

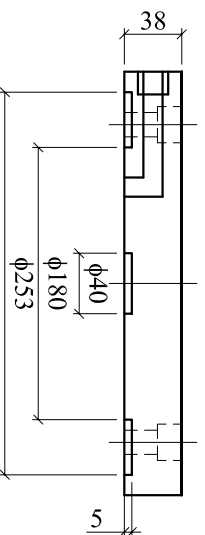
peças para montagem

Placa superior

Vista superior

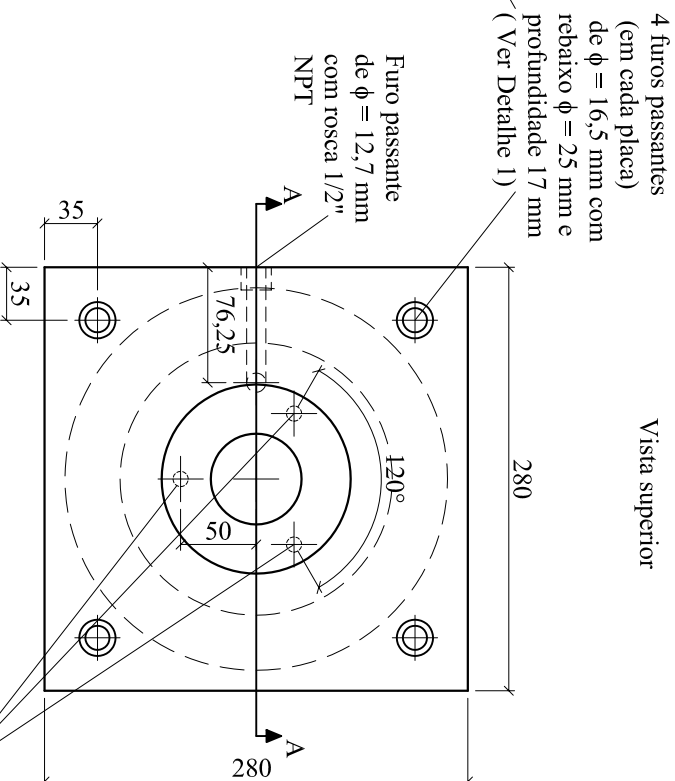


Corte A-A

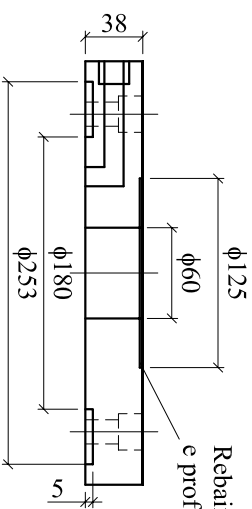


Placa inferior

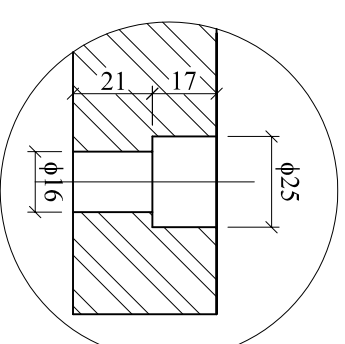
Vista superior



Corte A-A



Detalhe 1



3 furos com rosca M10 x 20 mm

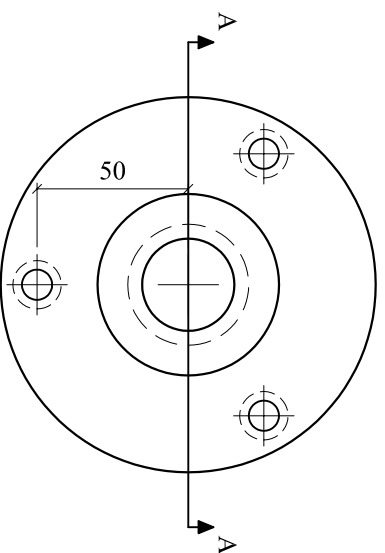
Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapas:	Cilindros Bellofram
Detalhamento:	Cilindro Bellofram grande
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Data:	20/01/06
Escala:	1/5
Prancheta:	CB-06

CILINDRO BELLOFRAM GRANDE

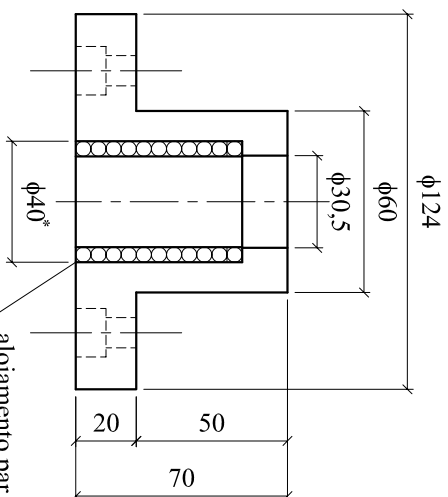
peças para montagem

Bucha para rolamentos lineares

Vista superior



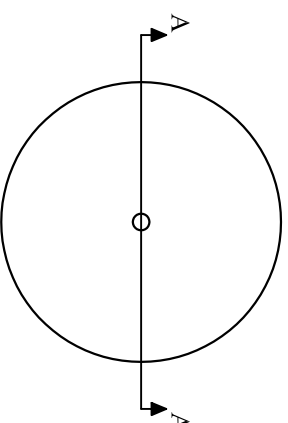
Corte A-A



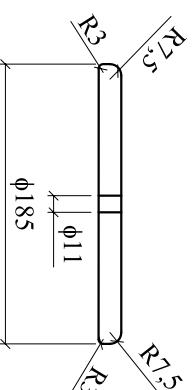
escala 1/2,5

Disco central

Vista superior



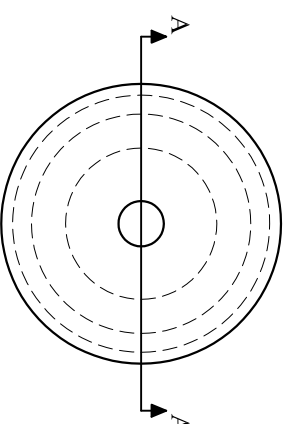
Corte A-A



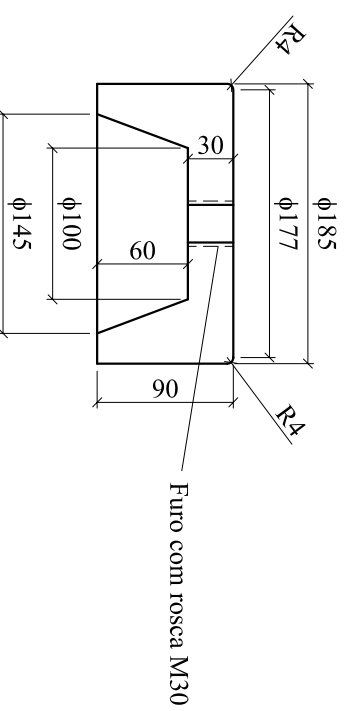
escala 1/5

Peça central

Vista superior



Corte A-A



Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil	
Projeto:	Equipamento Hollow Cylinder Torsional
Etapa:	Cilindros Bellofram
Desenhamento:	Cilindro Bellofram grande
Responsáveis técnicos:	Juliana de A. Bernardes, Adriano V. D. Bica
Data:	20/01/06
Escala:	indicada
Prancha:	CB-07